

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРОВ

2–е издание, переработанное и дополненное

Под редакцией **И. П. Копылова**

*Допущено Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов электромеханических
и электроэнергетических специальностей вузов*

Москва • Юрайт • 2012

УДК 621.313
ББК 31.26я73
К55

Автор:

Копылов Игорь Петрович — доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии, крупный ученый в области электромеханики.

Рецензент:

Бут Д. А. — профессор, бывший заведующий кафедрой «Электроэнергетические и электромеханические системы» Московского государственного авиационного института.

Копылов, И. П.

К55 Электрические машины : учебник для бакалавров / под ред. И. П. Копылова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2012. — 675 с. — Серия : Бакалавр.

ISBN 978-5-9916-1501-3

Рассмотрены теория электромеханического преобразования энергии электрических машин, их характеристики, переходные и установившиеся режимы работы. Теория электрических машин изложена на базе дифференциальных уравнений. Максимально использованы современные достижения общей теории электрических машин. Получила дальнейшее развитие классическая теория комплексных уравнений, векторных диаграмм и схем замещения.

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту ВПО третьего поколения.

Для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. Может быть полезен инженерам-электромеханикам и энергетикам, занимающимся проектированием, ремонтом и эксплуатацией электрических машин.

УДК 621.313
ББК 31.26я73

Покупайте наши книги:

Оптом в офисе книготорга «Юрайт»:

140004, Московская обл., г. Люберцы, 1-й Панковский проезд, д. 1,
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru, www.urait.ru

В розницу в интернет-магазине: www.urait-book.ru,
e-mail: order@urait-book.ru, тел.: (495) 742-72-12

Для закупок у Единого поставщика

в соответствии с Федеральным законом от 21.07.2005 № 94-ФЗ
обращайтесь по тел.: (495) 744-00-12,
e-mail: sales@urait.ru, vuz@urait.ru

ISBN 978-5-9916-1501-3

© Копылов И. П., 2012

© ООО «Издательство Юрайт», 2012

Оглавление

Предисловие	7
Глава 1. Введение в электромеханику	10
1.1. Электромеханика и социальный прогресс	10
1.2. Краткая история развития электрических машин	17
1.3. Классификация электромеханических преобразователей	30
1.4. Основные конструктивные исполнения электрических машин	34
1.5. Законы электромеханики	39
1.6. Обобщенная электрическая машина	47
1.7. Бесконечный спектр гармоник поля. Обобщенный электро-механический преобразователь	54
1.8. Магнитное поле машины	63
1.9. Вращающееся магнитное поле	74
1.10. Обмотки электрических машин	80
1.11. Наведение ЭДС в обмотках электрических машин	90
1.12. Магнитодвижущие силы обмоток	98
1.13. Электромагнитный момент	103
1.14. Уравнения электромеханического преобразования энергии ...	106
1.15. Параметры электрических машин	113
1.16. Система относительных единиц	121
1.17. Потери и коэффициент полезного действия	122
1.18. Нагрев и охлаждение электрических машин	127
1.19. Материалы, применяемые в электромашиностроении	136
1.20. Подход к проектированию электрических машин	146
Глава 2. Трансформаторы	149
2.1. Назначение и общие сведения о трансформаторах	149
2.2. Уравнения трансформатора	151
2.3. Векторная диаграмма трансформатора	156
2.4. Схема замещения трансформатора	160
2.5. Трехфазные трансформаторы	162
2.6. Параметры схемы замещения трансформатора	164
2.7. Конструкции трансформаторов	176
2.8. Схемы и группы соединений	189
2.9. Особенности работы насыщенных однофазных и трехфаз-ных трансформаторов	194
2.10. Характеристики трансформаторов	199
2.11. Параллельная работа трансформаторов	204

2.12. Многообмоточные трансформаторы	206
2.13. Автотрансформаторы	213
2.14. Последовательные трансформаторы	217
2.15. Регулирование напряжения трансформатора	220
2.16. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов ...	224
2.17. Переходные процессы в трансформаторах	231
2.18. Специальные трансформаторы	241
2.19. Подход к проектированию трансформаторов	258
Глава 3. Асинхронные машины	268
3.1. Режимы работы и области применения асинхронных машин	268
3.2. Математическое описание процессов преобразования энергии в асинхронных машинах	270
3.3. Конструкции асинхронных машин	275
3.4. Обмотки асинхронных машин	282
3.5. Векторная диаграмма асинхронной машины	289
3.6. Схема замещения асинхронной машины	293
3.7. Круговая диаграмма	299
3.8. Построение круговой диаграммы по опытным данным. Рабочие характеристики	307
3.9. Точность круговой диаграммы	314
3.10. Электромагнитный момент идеальной асинхронной машины	317
3.11. Влияние высших гармоник поля на момент асинхронной машины	325
3.12. Влияние вихревых токов на момент асинхронной машины ...	332
3.13. Учет нелинейности параметров в статических режимах ...	338
3.14. Переходные процессы в асинхронных машинах	344
3.15. Регулирование частоты вращения	353
3.16. Работа асинхронного двигателя при несинусоидальном несимметричном напряжении питания	363
3.17. Аномальные режимы работы асинхронных машин	367
3.18. Генераторный, тормозной и трансформаторный режимы работы асинхронной машины	372
3.19. Однофазные двигатели	380
3.20. Специальные асинхронные машины	388
3.21. Асинхронные машины автоматических устройств	396
3.22. Серии асинхронных двигателей	406
Глава 4. Синхронные машины	413
4.1. Режимы работы синхронных машин	413
4.2. Процессы преобразования энергии в синхронных машинах ...	416
4.3. Конструкции синхронных машин	423
4.4. Магнитное поле синхронной машины при холостом ходе ...	435
4.5. Расчет магнитной цепи синхронных машин	440
4.6. Магнитное поле синхронной машины при нагрузке. Реакция якоря	443

4.7. Параметры синхронных машин в установившемся режиме ...	447
4.8. Характеристики синхронных генераторов	453
4.9. Векторные диаграммы неявнополюсных синхронных генераторов	459
4.10. Векторные диаграммы синхронных явнополюсных генераторов	463
4.11. Параллельная работа синхронных машин	467
4.12. Включение на параллельную работу синхронных генераторов	471
4.13. Угловая характеристика. Синхронизирующая мощность. Регулирование реактивной мощности	473
4.14. Электромагнитная и синхронизирующая мощности явнополюсной синхронной машины	479
4.15. Синхронные двигатели	481
4.16. Синхронный компенсатор	486
4.17. Несимметричная нагрузка трехфазных генераторов	488
4.18. Несимметричные короткие замыкания	494
4.19. Переходные процессы в синхронных машинах	496
4.20. Переходные процессы при гашении поля	503
4.21. Качания синхронных машин. Динамическая устойчивость	507
4.22. Системы возбуждения синхронных машин	512
4.23. Специальные синхронные машины	516
4.24. Серии синхронных машин	529
Глава 5. Машины постоянного тока	538
5.1. Процессы преобразования энергии в машинах постоянного тока	538
5.2. Уравнения машин постоянного тока	542
5.3. Конструкции машин постоянного тока	547
5.4. Обмотки якорей машин постоянного тока	553
5.5. Холостой ход генератора постоянного тока	559
5.6. Поле машины постоянного тока при нагрузке	565
5.7. Коммутация	571
5.8. Способы улучшения коммутации	577
5.9. Генераторы постоянного тока	585
5.10. Двигатели постоянного тока	596
5.11. Переходные процессы в машинах постоянного тока	604
5.12. Специальные машины постоянного тока	609
5.13. Вентильные двигатели.....	625
5.14. Машины постоянного тока, выпускаемые в России и странах СНГ	630
Глава 6. Коллекторные машины переменного тока	633
6.1. Электромеханическое преобразование энергии в коллекторных машинах переменного тока	633
6.2. Трехфазные коллекторные двигатели	635
6.3. Однофазные коллекторные двигатели	640

Глава 7. Каскадные соединения электрических машин. Электромашинные преобразователи	644
7.1. Каскадные соединения асинхронной машины с коллекторными машинами	644
7.2. Электромашинные преобразователи	649
7.3. Одноякорный преобразователь	652
Глава 8. Емкостные и индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи	656
8.1. Емкостные электромеханические преобразователи	656
8.2. Индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи	661
8.3. Биодвигатели	664
Список литературы	668
Предметный указатель	670

Предисловие

Прогресс в развитии электромашиностроения зависит от успехов в области теории электрических машин. Глубокое понимание процессов электромеханического преобразования энергии необходимо не только инженерам-электромеханикам, создающим и эксплуатирующим электрические машины, но и многим специалистам, деятельность которых связана с электромеханикой.

В годы перестройки в высшей школе произошли значительные изменения. Многие вузы получили статус технических университетов, что потребовало изменить содержание учебных программ в сторону увеличения их научного содержания и приближения к университетскому образованию. Все это коснулось и кафедр под названием «Электрические машины», многие из которых стали называться кафедрами электромеханики, что потребовало большей теоретизации читаемых курсов. Новое издание учебника по электрическим машинам отвечает современным тенденциям в подготовке инженеров-электромехаников.

Данный учебник по электрическим машинам отличается от вышедших ранее тем, что изложение теории отдельных типов электрических машин начинается с дифференциальных уравнений, описывающих как установившиеся, так и переходные режимы, а затем, после получения уравнений установившегося режима, излагается классический материал — схемы замещения, векторные и круговые диаграммы.

В последние десятилетия благодаря широкому применению ЭВМ теория электрических машин получила дальнейшее развитие, и настало время ввести в общий курс многие достижения математической теории электрических машин, что автор и попытался сделать в данном учебнике. Углубленная математизация общего курса дает возможность более строго изложить теорию электрических машин и ввести более тщательные математические методы исследования в смежные курсы, такие как «Проектирование электрических машин», «Электрические машины автоматических устройств» и др.

Изложение теории электрических машин начинается с законов электромеханического преобразования энергии и урав-

нений обобщенной машины. При этом подчеркивается общность различных электрических машин, что позволяет создать единое математическое описание процессов электро-механического преобразования энергии в индуктивных, емкостных и индуктивно-емкостных электромеханических преобразователях.

В последние годы появились новые конструктивные видоизменения электрических машин: линейные двигатели, машины с несколькими степенями свободы, с жидким и газообразным ротором и др. Инженер-электромеханик должен уметь подойти к созданию и исследованию любой электрической машины — электромеханического преобразователя энергии, поэтому основы общей теории электромеханического преобразования энергии должны излагаться не только в специальных курсах, но и в общем курсе электрических машин.

Книга начинается с главы «Введение в электромеханику», в которой приводятся законы электромеханики, классификация и основные конструктивные исполнения электрических машин, рассматриваются поля, МДС и обмотки основных типов электрических машин. Эта глава содержит материал, который обычно располагался в главе «Общие вопросы машин переменного тока». Наличие в середине курса такой главы в старых программах нарушало стройность изложения и затрудняло проведение лабораторных работ. Следует отметить, что общие положения электромеханики, приведенные в этой главе, распространяются и на машины постоянного тока.

В главах, посвященных теории и конструкции отдельных видов электрических машин, наиболее подробно рассматривается их традиционное исполнение и в конце каждой главы излагаются принципы действия и устройство наиболее распространенных специальных исполнений. Например, в главе «Трансформаторы» дано описание сверхпроводящих индуктивных накопителей, а в главе «Машины постоянного тока» — вентильных двигателей и т.п.

В учебнике несколько расширен материал по коллекторным электрическим машинам, электромашинным преобразователям и каскадным схемам, так как понимание процессов преобразования энергии в этих машинах помогает разобраться в работе электротехнических устройств с полупроводниковыми преобразователями.

Кратко рассмотрена теория емкостных и индуктивно-емкостных электромеханических преобразователей. Хотя

такие машины практически не нашли применения, они заслуживают внимания, так как знакомство с ними расширяет представления об электрических машинах и позволяет сделать важные обобщения.

Автор старался создать учебник, который отвечает программам бакалавров, инженеров и магистров, при этом лектор должен найти в нем материал, соответствующий современным требованиям к трехуровневой подготовке специалистов по разделу «Электромеханика».

Автор благодарит профессора Д. А. Бута за глубокий анализ рукописи и высокий профессионализм при рецензировании и сотрудников кафедры «Электромеханика» МЭИ (ТУ) за полезные замечания.

Все замечания и пожелания, которые автор примет с благодарностью, следует направлять в издательство «Юрайт».

Автор

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ

1.1. Электромеханика и социальный прогресс

Уровень развития материальной культуры человеческого общества определяется в первую очередь созданием и использованием источников энергии.

Применение пара и уже более 100 лет — электричества совершило техническую революцию в промышленности и оказало решающее влияние на развитие социальных отношений. В настоящее время в наиболее развитых странах на одного человека приходится до 10 кВт всех видов энергии. Это примерно в 100 раз больше, чем мускульная мощность человека, которая еще 200 лет назад была основной в промышленности и сельском хозяйстве.

С полным основанием можно считать, что технический и культурный уровень развития государства определяется количеством электроэнергии, вырабатываемой на душу населения.

Почти вся электрическая энергия (на долю химических источников приходится незначительная часть) вырабатывается электрическими машинами, способными работать не только в генераторном, но и в двигательном режиме, преобразуя электрическую энергию в механическую. Обладая высокими энергетическими показателями и меньшими, по сравнению с другими преобразователями энергии, расходами материалов на единицу мощности, экологически чистые электромеханические преобразователи имеют в жизни человеческого общества огромное значение.

Первые городские электростанции появились в самом конце XIX в. Сегодня установленная мощность электростанций на Земле равна примерно 4000 млн кВт. Выработка электроэнергии достигла примерно 25 000 млрд кВт·ч в год. Если и далее производство электроэнергии будет расти такими же темпами, то в ближайшие годы оно достигнет

0,1% всей энергии, получаемой Землей от Солнца. Производство электроэнергии становится глобальным и влияет на окружающую нас среду.

В нашей стране за последние 80 лет выработка электроэнергии увеличилась в 1000 раз. Особенно быстро она росла в 1950—1980 гг. В наследство от царской России страна получила несколько электростанций мощностью всего в 1000 МВт. В 1920 г. по инициативе В. И. Ленина был принят государственный план электрификации России — план ГОЭЛРО, по которому предусматривалось за 10—15 лет построить 20 тепловых и 10 гидравлических электростанций мощностью 1750 МВт. План был выполнен досрочно, и уже в 1935 г. вместо 30 было введено в строй 40 электростанций, выработка электроэнергии превысила планируемую вдвое.

После Великой Отечественной войны энергетика развивалась особенно быстрыми темпами. Были построены каскады гидростанций на Волге и Днепре, мощные тепловые электростанции и атомные станции. До 1990-х гг. выработка электроэнергии в нашей стране удваивалась за 8—10 лет. Уже в 1985 г. в СССР было выработано более 1,5 трлн кВт·ч электроэнергии. Производство электроэнергии на атомных электростанциях в последние годы достигло 20% общего объема. Электротехническая промышленность обеспечивает изготовление электрических машин и другого оборудования для энергетики и других отраслей народного хозяйства. Для передачи, распределения и использования электрической энергии на каждую единицу установленной мощности на электростанциях требуется изготовить пять-шесть единиц мощности трансформаторов и электрических двигателей.

В настоящее время в отрасли насчитывается около 100 крупных заводов и научно-производственных объединений. Крупнейшими научно-производственными объединениями, имеющими международную известность, являются «Электросила» (г. Санкт-Петербург), «Динамо» (г. Москва), Уралэлектротяжмаш (г. Екатеринбург) и др. [1, 3].

Электротехническая промышленность выпускает в год миллионы электрических машин для всех отраслей народного хозяйства. Без них не может развиваться ни одна комплексная научная программа. Электрические машины работают в космосе и глубоко под землей, в океане и активной зоне атомных реакторов, в животноводческих помещениях и медицинских кабинетах. Без преувеличения можно сказать,

что электромеханика определяет технический прогресс в большинстве основных отраслей промышленности.

Колоссальный рост выработки электроэнергии мог быть обеспечен только при росте мощности турбо- и гидрогенераторов, установленных на тепловых, атомных и гидравлических станциях. Единичная мощность тепловых электростанций достигла 4,8 млн кВт, а самая крупная у нас гидростанция — Саяно-Шушенская (она будет восстановлена в 2014 г.) — имела мощность 6,6 млн кВт. Установленная мощность генераторов на электростанциях России в 2000 г. превысила 150 млн кВт.

На тепловых и атомных электростанциях в качестве генераторов применяются быстроходные электрические машины — турбогенераторы с частотой вращения 3000 и 1500 об/мин. На гидростанциях работают тихоходные генераторы электрической энергии — гидрогенераторы.

На рис. 1.1 показан рост единичной мощности турбогенераторов за послевоенные годы. За 30 лет усилиями инженеров-электромехаников удалось, практически в одних и тех же габаритах, увеличить мощность турбогенераторов в 10 раз. Это стало возможным главным образом в результате улучшения охлаждения машины. Сначала в качестве охлаждающей среды применялся воздух, затем водород, а в последних конструкциях внутреннее охлаждение проводников обмоток осуществляется водой или воздухом.

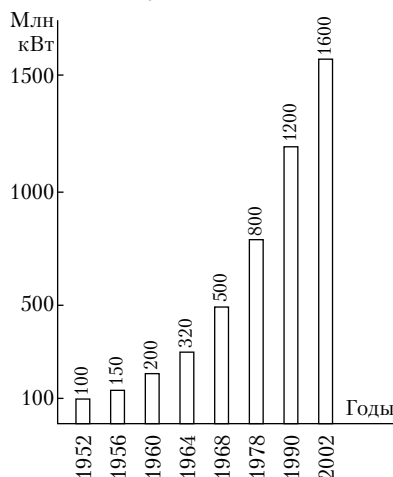


Рис. 1.1. Рост единичной мощности турбогенераторов

Для установки мощного турбогенератора нужна относительно небольшая площадь электростанции. Значит, сокращаются расходы на сооружение машинного зала, станцию можно быстрее ввести в строй. И наконец, чем крупнее электрическая машина, тем выше ее КПД.

Однако все эти преимущества не исключают технических трудностей, возникающих при создании крупных энергетических агрегатов. И, что самое существенное, их мощность

можно увеличивать лишь до определенных пределов. Расчеты показывают — перешагнуть верхний предел, ограниченный мощностью турбогенератора 2500 МВт, ротор которого вращается с частотой 3000 об/мин, не удастся, так как этот предел определяется в первую очередь прочностными характеристиками: напряжения в механической конструкции машины более высокой мощности возрастают настолько, что центробежные силы неизбежно вызовут разрушение ротора.

Немало сложностей возникает при транспортировке. Для перевозки того же турбогенератора мощностью 1200 МВт пришлось построить сочлененный транспортер грузоподъемностью 500 т, длиной почти 64 м. Каждая из двух его тележек опиралась на 16 вагонных осей.

В настоящее время освоен серийный выпуск турбогенераторов мощностью 500 и 800 МВт. На Костромской тепловой электростанции работают турбогенераторы мощностью 1200 МВт. Для атомных электростанций освоен выпуск турбогенераторов мощностью 1000 МВт с частотами вращения 1500 и 3000 об/мин и мощностью 1600 МВт на 1500 об/мин. Это самые крупные и экономичные энергетические установки в мире. Коэффициент полезного действия турбогенератора мощностью 1200 МВт составляет 99,2%, а расход материалов — 0,5 кг/кВт.

Резервы повышения мощности турбогенераторов увеличиваются при применении обмоток из сверхпроводящих сплавов, работающих при температуре, близкой к 4 К, когда активное сопротивление практически равно нулю. Использование явления сверхпроводимости позволит довести единичную мощность электрических машин до 2–3 млн кВт. Создан криотурбогенератор мощностью 320 МВ·А, 3000 об/мин и ведутся работы по увеличению мощности криотурбогенераторов.

Гидрогенератор Саяно-Шушенской ГЭС имел мощность 712 МВ·А. Это один из крупнейших гидрогенераторов в мире. Его КПД равен 98,4%, $\cos \varphi = 0,9$ при частоте вращения 142,8 об/мин. Масса гидрогенератора 1790 т. С 1967 г. на Красноярской ГЭС успешно эксплуатируются гидрогенераторы мощностью 590 МВ·А. За годы эксплуатации станция несколько раз окупала расходы на ее строительство. В течение полувека вырабатывают дешевую электроэнергию гидрогенераторы каскада Волжских, Братской, Красноярской, Усть-Илимской ГЭС и др. В 2008 г. завершено проектирование гидрогенераторов мощностью 1600 МВт, а также еще большей мощности для ГЭС Восточной Сибири.

Для передачи и распределения электроэнергии требуются трансформаторы, автотрансформаторы и реакторы. На основе достижений советских электротехников созданы трансформаторы для передачи огромных энергетических мощностей на большие расстояния при напряжениях 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока.

В России выпускаются самые мощные в мире автотрансформаторы типа АОДЦТ-667000/1150/500, предназначенные для связи электрических сетей переменного тока напряжением 1150 и 500 кВ. Номинальная мощность автотрансформатора 667 000 кВ·А, масса 580 т. Уникальными установками являются трансформаторы, предназначенные для работы на электростанциях в качестве повышающих в блоке с турбогенераторами 1000 и 800 МВт. Трансформаторные заводы страны выпускают реакторы, специальные трансформаторы, комплектные трансформаторные подстанции и другие устройства, обеспечивающие надежную работу энергосистем и электроснабжение потребителей электроэнергией.

Две трети электроэнергии, выработанной на электростанциях, преобразуется различными электроприводами в механическую энергию. Электрические двигатели постоянно и переменного тока строятся на мощности от долей ватта до десятков тысяч киловатт, на напряжения от нескольких вольт до десятков киловольт. Частоты вращения охватывают диапазон от одного оборота в сутки до 500 000 об/мин. Выпускаются двигатели, обеспечивающие точные угловые и линейные перемещения, работающие при изменении частоты вращения в диапазоне 1—1000 и выше, при температуре, близкой к абсолютному нулю, и 600 К, работающие в агрессивных средах, в вакууме и при высоких давлениях. Электродвигатели имеют бесчисленные конструктивные исполнения. При создании электродвигателей электромеханикам удавалось решить почти все проблемы, которые ставились перед ними промышленностью, но проблем не становится меньше.

Электротехническая промышленность разработала и выпускает электродвигатели во взрывозащищенном исполнении на 1140 В, что позволило в 1,5—2 раза увеличить среднесуточную добычу угля. Для карьерных и шагающих экскаваторов изготавливаются двигатели в так называемом экскаваторном исполнении. Выпускаются тяговые двигатели для электровозов, работающих в карьерах. Для нефтяной

промышленности выпускаются погружные двигатели, работающие при 90°С, и нагревостойкие электробурь. Усилиями электромехаников созданы различные электродвигатели, обеспечивающие надежную работу агропромышленного комплекса. Для бытового применения выпускается большая гамма электрических машин, обеспечивающая работу холодильников, пылесосов, стиральных и других бытовых приборов. Электрические двигатели широко используются в медицинской технике.

Особая роль отводится электрическим машинам в космической, авиационной и морской технике. Электрические машины, работающие на передвижных установках, выпускаются в больших количествах. Эти машины должны иметь минимальные габариты при высоких энергетических показателях и высокую надежность. Отдельную область электромеханики составляют электрические машины систем автоматического управления, где электрические машины используются в качестве датчиков скорости, положения, угла и являются основными элементами сложнейших навигационных систем.

Невозможно для каждого заказчика создавать отдельную электрическую машину, поэтому они выпускаются сериями. В нашей стране самой массовой серией электрических машин является общепромышленная серия асинхронных машин 4А. Серия включает в себя машины мощностью от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 стандартных высотах оси вращения. На каждую из высот вращения выпускаются двигатели двух мощностей, отличающиеся по длине. На базе единой серии производятся различные модификации двигателей, которые обеспечивают технические требования большинства потребителей. Большими сериями выпускаются синхронные машины, машины постоянного тока, микромашины и трансформаторы. Серийное изготовление машин позволяет модифицировать отдельные узлы и детали, применять поточные автоматические линии и обеспечивать необходимый выпуск электрических машин при минимальных затратах [1].

В последние годы Ярославский электромашиностроительный завод разработал и выпускает серию РА — Российская асинхронная; Владимирский электромоторный завод — серию 5А.

Серии электрических машин обновлялись каждые 8—10 лет. Проектирование серий имеет важное значение для все-

го народного хозяйства и требует высокой профессиональной подготовки научных коллективов. Несмотря на бесконечное разнообразие электрических машин, они объединяются единой теорией электромеханического преобразования энергии.

Как в практике электромашиностроения, так и в области теории электрических машин сделано уже многое и достигнуты несомненные успехи. Но нельзя думать, что все основное уже завершено и остается только изучать созданное старшим поколением электромехаников.

Сегодня перед электромеханиками стоят трудные и интересные проблемы, которые требуют глубокого знания теории, проектирования и технологии изготовления электрических машин.

К основной проблеме в области электромеханики следует отнести создание электрических машин, использующих новые нетрадиционные источники энергии. Таким образом, электромеханическое преобразование энергии и в будущем будет основным в энергетике, поэтому создание электрогенераторов, использующих новые источники энергии, — особая задача электромехаников.

До сих пор практическое применение находит один класс электрических машин — индуктивные, в которых электромеханическое преобразование энергии происходит в магнитном поле. Электромеханические преобразователи, в которых одновременно идет преобразование энергии в электрическом и электромагнитном полях, еще не нашли применения в промышленности. Создание таких электрических машин — одна из трудных проблем электромеханики.

Особенностью развития электромашиностроения в настоящий период является то, что дальнейшее наращивание выпуска электрических машин происходит с учетом жестких требований экономии материалов, электроэнергии и трудовых ресурсов. Первостепенная задача заключается в создании более экономичных, технологичных и менее металлоемких электрических машин. Сотни повседневных задач, связанных с повышением энергетических показателей, улучшением надежности, снижением шума и вибраций, созданием безотходной технологии, проектированием новых электрических машин, ежедневно решаются большой армией инженеров-электромехаников, обеспечивающих технический прогресс в электромашиностроении.

1.2. Краткая история развития электрических машин

Чтобы глубоко разобраться в закономерностях развития любой отрасли знания, необходимо знать ее историю. История развития электрических машин весьма поучительна и заслуживает внимания [3].

Принято считать, что история электрических машин начинается с создания М. Фарадеем в 1821 г. электрического двигателя, который представлял собой постоянный магнит 1, вокруг которого вращался проводник с током 2 (рис. 1.2). Скользящий контакт обеспечивался ртутью, налитой в чашу 3, и верхней опорой 4. В двигателе при постоянном токе в проводнике и постоянном магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, осуществлялось преобразование электрической энергии в механическую.

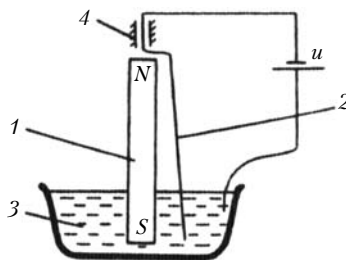


Рис. 1.2. Двигатель Фарадея

Открытие Фарадея не было случайным, оно подготовлено работами многих физиков. В 1799 г. итальянский ученый А. Вольта создал электрохимический генератор — вольтов столб, который состоял из цинковых и медных дисков, разделенных прокладками, смоченными кислотой.

Русский академик В. В. Петров в 1802 г. создал батарею из 4200 медных и цинковых пластин, которая имела ЭДС 1700 В и полезную мощность 85 Вт. Ему впервые удалось наблюдать электрическую дугу. Эксперименты с вольтовым столбом позволили изучить тепловые и магнитные действия электрического тока.

В 1820 г. французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром был сформулирован закон действия тока на магнит. В том же году Г. Эрстед опубликовал работу, в которой описывалось отклонение магнитной стрелки под действием электрического тока, а Ф. Араго предложил соленоид. В 1821 г. Х. Дэви обнаружил влияние на проводимость температуры и материала проводника. Результаты исследований Г. Ома (закон Ома) были опубликованы в 1827 г.

Электрические и магнитные явления были известны еще в XVIII в. и значительно раньше. Первой работой по электричеству был трактат «О магните, магнитных телах и о боль-

шом магните — Земле», который написал английский ученый У. Гильберт в 1600 г. Он назвал электрическими тела, способные электризоваться, и ввел термин «электричество».

О. Гергасе в 1650 г. описал первую электрическую машину трения, которая состояла из сделанного из серы шара. При вращении его натирали ладонями рук.

В начале XVIII в. Ф. Гауксби заменил шар из серы полым стеклянным шаром. В 1743 г. в машину был введен скользящий контакт, который снимал заряды, и машина стала непрерывно отдавать электрическую энергию. В конце XVIII в. изобретена емкостная электрическая машина, ротор которой был выполнен в виде диска диаметром 2 м. Эта машина создавала искры длиной около 2 м.

Атмосферным электричеством, молниеотводами много занимались М. В. Ломоносов, Г. В. Рихман, Б. Франклин. В 1783 г. Ш. Кулон сформулировал закон взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов. В это время в России А. Т. Болотовым, И. П. Кулибиным и другими учеными были изобретены переносные емкостные электрические машины, которые использовались для лечения и проведения психологических опытов.

В XIX и XX вв. емкостные машины трения, или электрофорные машины, продолжали развиваться, но как силовые электромеханические преобразователи применялись только индуктивные машины и о емкостных электрических машинах почти забыли.

В 1823 г. П. Барлоу предложил двигатель (рис. 1.3), который состоял из колеса 1 и постоянного магнита 2. Как и в двигателе Фарадея, скользящий контакт создавался с помощью ртути, налитой в банку 3, и провода, подсоединенного к валу. Питание двигателя осуществлялось от батареи химических элементов.

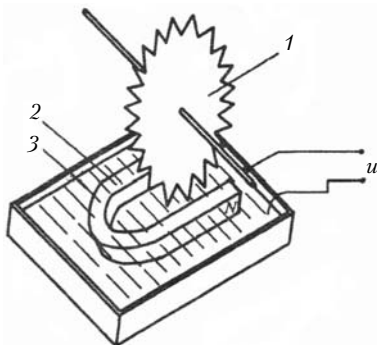


Рис. 1.3. Колесо Барлоу

Питание двигателя осуществлялось от батареи химических элементов.

В 1824 г. Ф. Араго обнаружил, что при вращении медного диска над магнитной стрелкой стрелка увлекается в сторону вращения диска. Это явление получило объяснение только после открытия закона электромагнитной индукции.

Фарадей в 1831 г., проведя тысячи опытов, показал возможность «превращения магнетизма в электричество», открыв закон электромагнитной индукции. В своих опытах он различал два вида индукции: индукцию тока током («вольта-электрическая индукция» по терминологии Фарадея) и магнитоэлектрическую индукцию («возбуждение электричества при помощи магнетизма»). Однако он заметил, что при дальнейшем изучении различие между двумя видами индукции исчезает.

В первой группе опытов Фарадей наблюдал появление индуктированного тока во вторичной катушке w_2 при коммутации первичной катушки w или при взаимном перемещении первичной и вторичной цепей. При этом в некоторых опытах для усиления явления он использовал стальные сердечники (рис. 1.4, а). Следует отметить, что эта установка имела все признаки трансформатора.

Во второй группе опытов индуктированный ток возникал при относительных перемещениях магнита и катушки или при замыкании и размыкании магнитной цепи. Фарадей показал, что на основании этих наблюдений можно построить электромеханический генератор, который состоял бы из магнита и полюсных наконечников, между которыми вращался медный диск (рис. 1.4, б). Если наложить одну щетку на периферию диска, а другую — на ось и в цепь щеток включить гальванометр, то последний при вращении диска фиксирует электрический ток.

Исключительно плодотворной и важной частью работ Фарадея явилось представление об электромагнитном поле, которое он первоначально представлял как «электротоническое состояние материи». Ученый впервые вводит понятие о магнитных силовых линиях. Он приписывал магнитным, а затем и электрическим силовым линиям физическую ре-

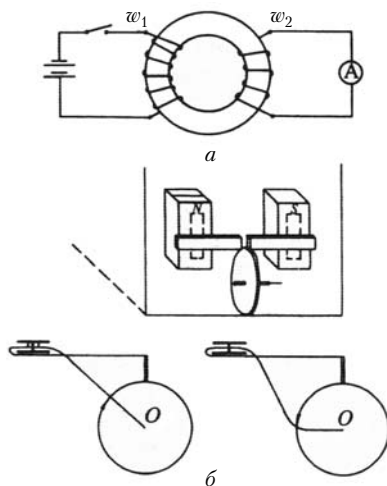


Рис. 1.4. Установки, на которых М. Фарадей изучал явления электромагнитной индукции

альность, наделял эти линии свойством тяжения, т.е. формировал представление о некоторой материальной среде, в которой происходят электромагнитные явления и через которую передаются те или иные действия.

Продолжатель дела Фарадея, его соотечественник Д. К. Максвелл писал о себе, что только переводил идеи Фарадея в математическую форму. Но вместе с тем он дал замечательную характеристику взглядов своего предшественника: «Приступив к изучению труда Фарадея, я установил, что его метод понимания явлений был также математическим, хотя и не представленным в форме обычных математических символов...»¹ Фарадей видел силовые линии, пронизывающие все пространство, там, где математики видели центры сил, притягивающих на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояний; Фарадей предполагал источник и причину явлений в реальных действиях, протекающих в среде, они же были удовлетворены тем, что нашли их в силе действия на расстоянии, приписанной электрическим флюидам.

Сын кузнеца из лондонского предместья, переплетчик, а затем лаборант в химической лаборатории, М. Фарадей стал самой крупной фигурой в электромеханике. Он был членом 68 научных обществ и академий, великим ученым и скромным человеком, автором глубоких научных трудов и популяризатором науки.

В 1832 г. Э. Ленд сформулировал закон о направлении индуцированного тока, а также принцип обратимости электрических машин. В 1838 г. он экспериментально показал возможность работы машины постоянного тока в генераторном и двигательном режимах.

На первом этапе развития электромеханики на конструкцию электрических машин значительное влияние оказывали успехи в создании паровых машин, в которых возвратно-поступательное движение поршня преобразовывалось во вращательное движение вала. В 1831 г. американский физик Д. Генри предложил двигатель возвратно-поступательного движения, в котором подвижный электромагнит 1 поочередно притягивался к постоянным магнитам 2 и отталкивался от них, замыкая и размыкая батареи гальванических элементов 3 (рис. 1.5). Двигатель Генри совершал 75 ка-

¹ Миткевич В. Ф. Магнитный поток и его преобразования. М.: АН СССР, 1946. С. 7.

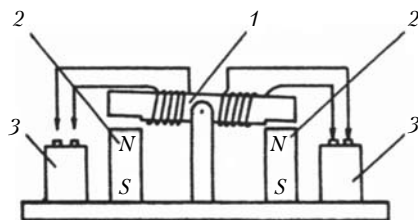


Рис. 1.5. Двигатель возвратно-поступательного движения
Генри

чаний/мин и имел мощность 0,04 Вт. Совершались и другие попытки создать электродвигатели возвратно-поступательного движения, но будущее было за электрическими машинами вращательного движения.

В 1834 г. петербургский академик Б. С. Якоби построил и описал электродвигатель, который работал за счет притяжения и отталкивания электромагнитов. Этот двигатель имел две группы электромагнитов: одну — вращающуюся 1, а другую — неподвижную 2 (рис. 1.6). Для изменения полярности подвижных электромагнитов использовался коммутатор 3, который состоял из колец, имеющих изолирующие вставки. В четырехполюсной машине было четыре медных и четыре изолирующих вставки. По кольцам скользил контакт, и при вращении осуществлялось изменение направления тока в обмотках подвижных электромагнитов. Напряжение подводилось к контактам 4 от гальванических элементов.

В 1838 г. Б. С. Якоби объединил 40 электродвигателей, работавших на два вала. Вместе с гальванической батареей, состоящей из 320 элементов, этот двигатель был установлен на боте, который с 12 пассажирами плавал по Неве несколько часов при сильном ветре против течения. Это было первое практическое применение электрических машин. Хотя электродвижение судов стало применяться только через

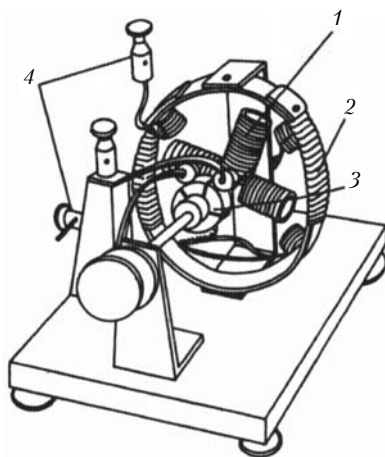


Рис. 1.6. Двигатель Якоби

100 лет, а двигатели на этом принципе не получили развития, работы ученого имели огромное значение для развития электромеханики. Применение двигателя Якоби показало, что гальванические источники электрической энергии не могут обеспечить длительную работу мощных электродвигателей. Необходимо было создавать иные источники электрической энергии. Ими стали электрические машины, работающие в генераторном режиме.

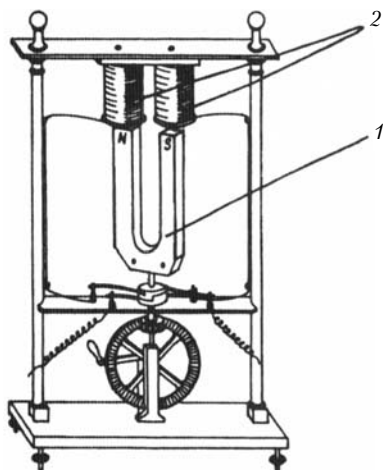


Рис. 1.7. Генератор братьев Пикси

Еще в 1832 г. братья Пикси на основе работ Фарадея сконструировали генератор с вращающимися постоянными магнитами 1. В неподвижных катушках 2 при вращении постоянных магнитов наводился переменный ток (рис. 1.7). Это один из первых генераторов переменного тока. Но переменный ток в то время не находил еще применения, и для выпрямления применялись механические коммутаторы.

Стремление повысить мощность электрических машин приводило к увели-

чению числа постоянных магнитов. Первые электрические машины были тяжелыми и громоздкими. В 1840—1860-х гг. французская фирма «Альянс» выпускала машины постоянного тока с расположенными в ряд 40—50 постоянными магнитами и соединенными последовательно или параллельно несколькими десятками катушек, расположенных на якоре. Такие машины мощностью 6—10 л. с. весили около 4 т. Большую часть массы машины составляли постоянные магниты.

Машины с самовозбуждением, в которых обмотка возбуждения подключалась к якору, появились после 1867 г., когда В. Сименс применил принцип самовозбуждения для генератора последовательного возбуждения. Первые патенты на самовозбуждение были получены С. Хиортом в 1854 г. и А. Иедликом в 1856 г.

В 1870 г. немецкий ученый З. Грамм получил патент на самовозбуждающийся генератор с кольцевым якорем

(рис. 1.8). На кольцевом якоре 1, намотанном из стальной проволоки, располагалась кольцевая замкнутая обмотка 2. Отпайки от обмотки выведены на коллекторные пластины 3, по которым скользят щетки 4. На станине имеются электромагниты 5 с полюсными наконечниками 6.

Обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой.

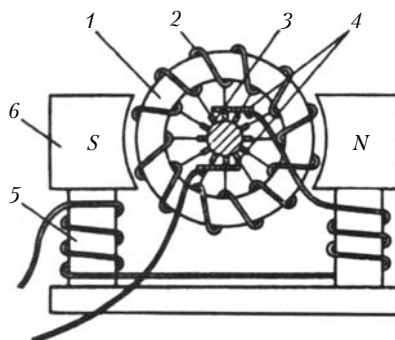


Рис. 1.8. Электрическая машина с кольцевой обмоткой
Пачинотти — Грамма

За 10 лет до Грамма якорь с кольцевой обмоткой запатентовал итальянец А. Пачинотти, но не сумел его применить. Кольцевой якорь принято называть якорем Пачинотти — Грамма, а распределенную обмотку называют граммовской обмоткой.

Изобретение кольцевой обмотки имело решающее значение для развития электрических машин. Если двигатель Фарадея по существу был униполярной машиной, которые в настоящее время находят ограниченное применение, а в двигателе Якоби обмотка якоря состояла из катушек и была разомкнутой, то замкнутая обмотка является основой почти всех современных машин. В разомкнутых обмотках происходят отключение и включение катушек, при этом почти вся энергия, запасенная в магнитном поле, преобразуется в тепло. В граммовской непрерывной обмотке при коммутации, когда секции обмотки переходят из одной параллельной ветви в другую, магнитное поле практически остается неизменным.

В 1873 г. Ф. Гефнер-Альтенек и В. Сименс создали машину с барабанным якорем, которая имела все основные элементы современной машины постоянного тока (рис. 1.9). В машине Грамма обмотка якоря, намотанная вокруг тороидального сердечника якоря, применялась нерационально, так как ЭДС наводилась только в части витка, расположенной на внешней части сердечника якоря, обращенной к полюсам. В якоре Сименса обе стороны витка обмотки располагались на внешней части сердечника, что обеспечивало лучшее использование меди и технологичность изготовления машины.

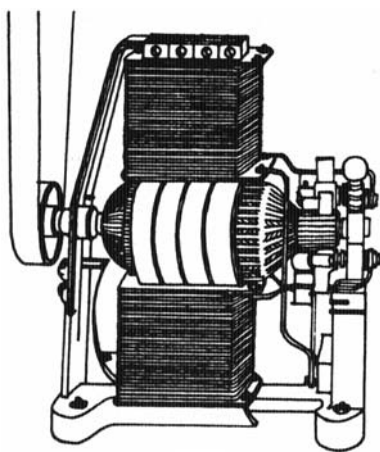


Рис. 1.9. Электрическая машина с барабанным якорем

и переменный ток долго не находил применения. Большое влияние на развитие однофазных сетей переменного тока оказали работы русского изобретателя П. Н. Яблочкова, который создал свечу для освещения улиц и помещений (1878 г.), индукторный генератор (1877 г.) и однофазный трансформатор с разомкнутым сердечником (1876 г.). Хотя еще М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции, а Б. С. Якоби и Г. Румкорф в 1840—1850-х гг. использовали индукционные катушки, изобретение П. Н. Яблочковым силового трансформатора с двумя отдельными обмотками имело важное значение для развития электротехники.

Коэффициент трансформации в трансформаторе П. Н. Яблочкова был равен единице. В 1882 г. Л. Голяр и Э. Гиббс предложили однофазный трансформатор с коэффициентом трансформации, не равным единице, и выдвигной сердечник,

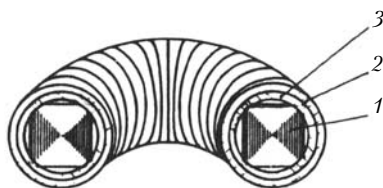


Рис. 1.10. Трансформатор Блати, Дэри и Циперновского

В 1880 г. Т. Эдисон предложил сделать якорь машины постоянного тока шихтованным из стальных изолированных друг от друга листов. В том же году для улучшения охлаждения Х. Максим придумал разделять якорь на пакеты. В 1884 г. была предложена компенсационная обмотка, а в 1885 г. — дополнительные полюсы, которые улучшали коммутацию машины постоянного тока.

До конца 1870-х гг. электрическая энергия использовалась для освещения,

с помощью которого плавно регулировалось напряжение. Братья Гопкинсоны в Англии в 1884 г. создали однофазный трансформатор с замкнутым сердечником и чередующимися обмотками высшего и низшего напряжений. В 1885 г. венгерские электротехники О. Бла-

ти, М. Дэри и К. Циперновский изобрели кольцевой, броневой и стержневой трансформаторы, имеющие высокие технико-экономические показатели. Они и ввели термин «трансформатор». В первых трансформаторах (рис. 1.10) сердечник 1 выполняли из стальной проволоки. Обмотка низкого напряжения 2 наматывалась ближе к сердечнику, а на нее наматывалась обмотка высокого напряжения 3. Масляное охлаждение трансформаторов применено Д. Свинбергом в 1880 г.

Электроэнергетика в 1870–1880-х гг. делала первые впечатляющие шаги. В 1879 г. В. Сименс на Берлинской выставке показал первую электрическую железную дорогу. В 1882 г. М. Депре передал на расстояние 57 км 2 кВт напряжением 1500–2000 В постоянного тока. Ф. Энгельс в 1883 г. по поводу этого писал: «...это колоссальная революция. Паровая машина научила нас превращать тепло в механическое движение, но использование электричества откроет нам путь к тому, чтобы превращать все виды энергии: теплоту, механическое движение, электричество, магнетизм, свет, одну в другую и обратно и применять их в промышленности... Это открытие окончательно освобождает промышленность почти от всяких границ, налагаемых местными условиями, делает возможным использование также и самой отдаленной водяной энергии, и если вначале оно будет полезно только для городов, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней»¹.

Системы однофазного переменного тока хотя и позволяли передавать энергию на большие расстояния, не решали проблемы применения переменного тока в промышленности. Однофазные двигатели переменного тока не имели пускового момента, имели низкие энергетические показатели и не годились для применения в электроприводах.

В конце 1880-х гг. Г. Феррарис и Н. Тесла создали двухфазный двигатель переменного тока, вращающееся магнитное поле в котором создавалось катушками, сдвинутыми в пространстве на 90°, и токами, сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 90°. Модель двухфазного двигателя Феррариса показана на рис. 1.11.

В 1889 г. выдающийся русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский предложил трехфазную систему пере-

¹ Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 35. С. 374.

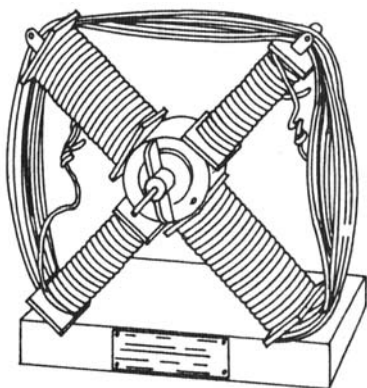


Рис. 1.11. Модель двухфазного асинхронного двигателя Феррариса

менных токов и в том же году построил первый трехфазный асинхронный двигатель и трансформатор. В качестве источника трехфазного тока он использовал машину постоянного тока, сделав три отпайки от обмотки под углом 120° и выведя их на три кольца. Весной 1889 г. был построен первый асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 180 Вт. Затем начали изготавливаться более мощные двигатели с короткоза-

мкнутой и фазной обмотками на роторе (рис. 1.12).

Трехфазный трансформатор был построен сначала с радиальным расположением обмоток, а в 1891 г. Доливо-Добровольский получил патент на трехфазный трансформатор с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости. Такая конструкция трансформатора применяется и в настоящее время.

Уже в 1891 г. на Международной электротехнической выставке была осуществлена передача трехфазным переменным током 230 кВ·А при напряжении 15 кВ на расстоя-

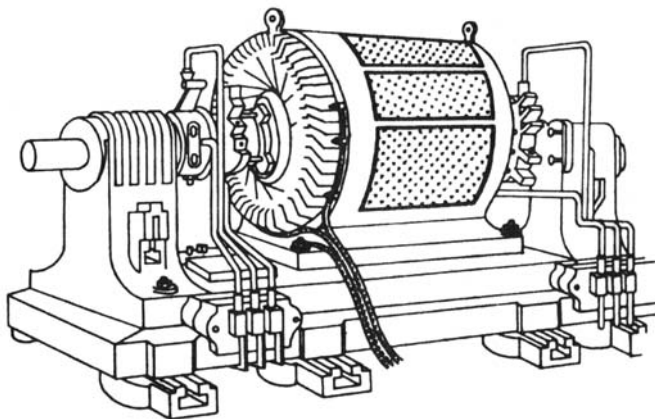


Рис. 1.12. Общий вид двигателя Доливо-Добровольского

ние 170 км. Максимальный КПД передачи был 75,2%. Трех-фазная система переменного тока с начала 1890-х гг. прочно вошла в энергетику.

В 1899 г. паровая турбина была впервые соединена с турбогенератором мощностью 1 МВт. Началось внедрение электричества во все отрасли промышленности. Стали строиться мощные электрические станции, крупные синхронные и асинхронные машины и трансформаторы. Впоследствии отдельные станции объединились в энергосистемы, мощности которых достигли сотен миллионов киловатт. В XX в. наряду с другими отраслями промышленности бурно развивалась электротехническая промышленность.

Мощности машин возросли в 100 и 1000 раз, расход материалов на единицу мощности был уменьшен в 10–100 раз. Для различных областей техники были созданы уникальные электрические машины не только как силовые преобразователи, но и как индикаторные устройства для точнейших навигационных и других систем автоматики.

В последние десятилетия патентные организации во всем мире выдают патент с названием «Электрическая машина». Трудно выделить из этого потока выдающиеся изобретения, так как было создано слишком много уникальных электромеханических систем, позволивших решить сложнейшие технические проблемы. Электрические машины прочно вошли во все сферы нашей жизни. Человек быстро к ним привык и в век урбанизации на фоне других удивительных достижений перестал их замечать. В середине XX в. произошло слияние электрических машин с машинами-орудиями и управляющими элементами, магнитными усилителями и полупроводниковыми преобразователями. Развивалось специальное машиностроение. Появились электромашинные усилители, различные исполнительные двигатели, шаговые двигатели, импульсные генераторы, МГД-генераторы и многие другие уникальные электрические машины. Однако создатели их, как правило, делая исторический обзор, указывали на аналоги (хотя и не очень схожие), созданные изобретателями в XIX в.

Начав свою историю с машин, в которых электромеханическое преобразование энергии осуществлялось в электрическом поле, в XIX–XX вв. электромеханика достигла поразительных успехов благодаря индуктивным электрическим машинам, в которых преобразование энергии осуществляется магнитным полем. За это время в области емкостных

машин были лишь отдельные удачные технические решения. В 1870 г. Дж. Уимшерст создал машину трения, которая демонстрируется в школах на курсах физики. В 1936 г. Р. Ван-де-Грааф построил генератор напряжением 6 млн В и мощностью 6 кВт, который применяется в испытательных установках для получения высоких постоянных напряжений. Как силовые преобразователи емкостные машины, несмотря на усилия выдающихся физиков А. Ф. Иоффе, Н. Д. Папалекси, Л. И. Мандельштама и других, не нашли практического применения. Но это не значит, что у емкостных машин нет будущего, они таят в себе большие возможности и должны внести свой вклад в развитие электромеханики.

Параллельно с созданием электрических машин развивалась теория электромеханического преобразования энергии. Почти все выдающиеся ученые XVIII—XIX вв. внесли свой вклад в развитие электротехники. Теории электрических машин касались М. В. Ломоносов, А. Ампер, Г. Ом, Д. Джоуль, Э. Ленд, Г. Гельмгольц и другие выдающиеся физики.

Особые заслуги в развитии электромагнитной теории принадлежат Д. К. Максвеллу, который в «Трактате об электричестве и магнетизме» (1873 г.) изложил математическую теорию электромагнитного поля. Уравнения Максвелла описывают теорию поля и являются фундаментом теории электромеханического преобразования энергии.

Большое значение для развития теории электрических машин имели работы профессоров Н. А. Умова и Д. Пойнтинга.

Первой теоретической работой по проектированию электрических машин можно считать работу Э. Арнольда по теории и конструированию обмоток, вышедшую в 1891 г.

Важное значение имели работы Г. Феррариса по теории трансформаторов и однофазных двигателей (1893 г.). Большое значение имели работы М. О. Доливо-Добровольского, создавшего основы теории и проектирования трансформаторов, им заложены основы проектирования асинхронных машин (1893 г.). Теорией трансформаторов в 1890-х гг. плодотворно занимались Г. Каппа, Х. Бен-Эшенбург и др.

Круговую диаграмму асинхронной машины предложил А. Гейланд (1894 г.), а более точную диаграмму — Г. Осанна (1900 г.). Математическое доказательство существования круговой диаграммы асинхронной машины дал К. А. Круг в 1907 г.

Большое значение для развития теории электрических машин имело введение в 1897 г. И. Штейнметцем символического метода и в 1920-х гг. Ч. Фортестью — метода симметричных составляющих.

К 1930-м гг. трудами многих ученых, и в первую очередь Э. Арнольда, А. Блонделя, М. Видмара, Л. Дрейфуса, К. А. Круга, В. С. Кулебакина, Р. Рихтера, К. И. Шенфера и других, была создана классическая теория установившихся режимов электрических машин. К этому времени написаны классические учебники по всем разделам электрических машин, в которых излагалась теория установившихся режимов электрических машин.

В довоенные и послевоенные годы большой вклад в развитие теории электрических машин внесли советские ученые В. П. Апаров, А. И. Вольдек, В. Т. Касьянов, М. П. Костенко, А. Н. Ларионов, Р. А. Лютер, Г. Н. Петров, Л. М. Пиотровский, П. С. Сергеев, В. А. Толвинский и др.

Важной вехой в развитии теории электрических машин является появление в 1930—1940-х гг. работ Г. Крона по общей теории электрических машин. Крон предложил модель и уравнения обобщенной машины, из которых могут быть получены уравнения всех видов индуктивных машин. Обобщения, сделанные им, значительно продвинули теорию электрических машин.

В последние десятилетия вычислительные машины позволили решать сложные системы дифференциальных уравнений, описывающие переходные и установившиеся режимы электрических машин с учетом нелинейностей, несинусоидальности питающего напряжения, многих контуров на статоре и роторе и других факторов, которые ранее при анализе процессов преобразования энергии не учитывались [7].

Трудами многих ученых — Б. Адкинса, Г. Вудсона, А. А. Горева, Л. Н. Грузова, Е. Я. Казовского, И. Ковача, Г. Н. Петрова, И. И. Трещева, Д. Уайта и иными — теория переходных процессов электрических машин продвинулась далеко вперед.

История развития электрических машин продолжается сегодня в многотысячных производственных, научных и учебных коллективах электромехаников, созданных И. А. Глебовым, А. Г. Иосифьяном, И. М. Постниковым, В. В. Романовым, Н. С. Сиуновым, Г. А. Сипайловым, Г. Н. Петровым и многими другими учеными [3].

В послевоенные годы достижения земной электромеханики были перенесены в космос и появилось новое направление в развитии электромеханики — космическая электромеханика, достижениями которой обусловлены успехи в развитии космонавтики. В середине 1990-х гг. автор настоящего учебника перенес достижения космической электромеханики на астрофизические объекты и положил начало развитию геоэлектромеханики — электромеханики планеты Земля и гелиоэлектромеханики — электромеханики Солнечной системы [5, 4].

1.3. Классификация электромеханических преобразователей

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и обратно: электрическую — в механическую. Электромеханическое преобразование энергии — одно из основных преобразований в окружающем нас мире. Это преобразование энергии используется в живой и неживой природе и в созданных человеком электрических машинах.

Понятие «электромеханический преобразователь» — более широкое, чем «электрическая машина». Принято считать, что электрические машины созданы человеком и применяются в различных сферах его деятельности. Это же пре-

образование энергии природы использует как в мельчайших живых организмах — бактериях и макрообъектах, таких как планеты и звезды [7, 6].

Электрические машины — электромеханические преобразователи (ЭП) — можно разделить на три класса: индуктивные электрические машины, в которых рабочим полем является магнитное поле; емкостные ЭП, в которых преобразование электрической энергии в механическую и обратно осу-

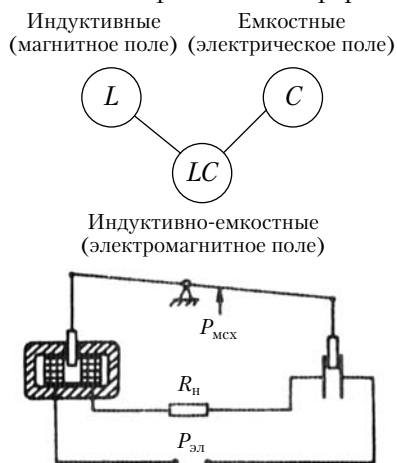


Рис. 1.13. Классы электромеханических преобразователей

полем, и индуктивно-емкостные ЭП, в которых электромеханическое преобразование осуществляется магнитным и электрическим полями. Принципиальные схемы ЭП показаны на рис. 1.13.

В индуктивных ЭП электромеханическое преобразование энергии происходит за счет изменения индуктивности (потокосцеплений) обмоток, а в емкостных ЭП — за счет изменения емкости. Индуктивно-емкостные ЭП в простейшем случае представляют собой объединение в одну электромеханическую систему движущихся частей и электрических цепей индуктивной и емкостной машин (см. рис. 1.13).

В индуктивных ЭП энергия концентрируется в магнитном поле, а в емкостных — в электрическом. В индуктивно-емкостных машинах преобразование энергии происходит в магнитном и электрическом полях.

На рис. 1.14, *а* на шкале единичной мощности от 0 до бесконечности представлены предпочтительные области распространения ЭП различных классов. На этой шкале мощностей есть две замечательные точки: 10^{-17} Вт — мощность ворсинки бактерии и 10^9 Вт — мощность турбогенератора — самой мощной электрической машины, созданной человеком. На рис. 1.14, *б* показаны предпочтительные области распространения различных классов электрических машин в зависимости от частоты сети.

Хотя ЭП с электрическим рабочим полем появились раньше индуктивных, они как силовые ЭП не нашли про-

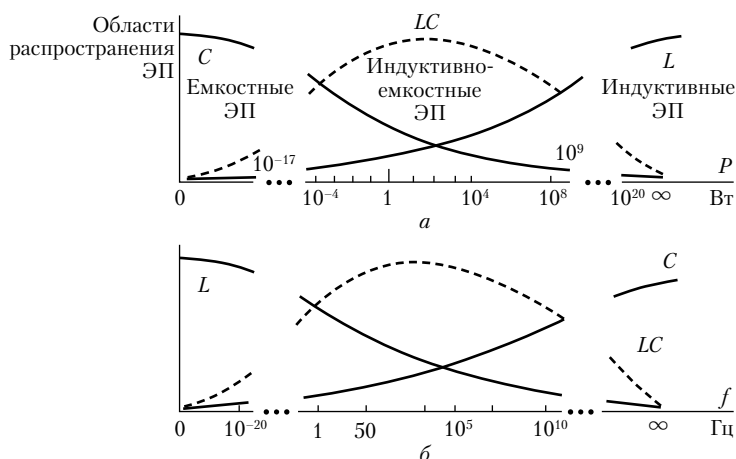


Рис. 1.14. Области предпочтительного распространения ЭП

мышленного применения. Сделаны пока лишь робкие попытки создания индуктивно-емкостных ЭП при использовании магнитострикционного и пьезоэлектрического эффектов.

Емкостные и индуктивно-емкостные ЭП будут немного представлены в гл. 8 учебника. Далее рассматриваем только индуктивные электрические машины, которые получили господствующее положение во всех сферах жизни современного общества.

Все разновидности индуктивных электрических машин по роду питания можно разделить на машины переменного и постоянного тока.

Машины **переменного тока** делятся на синхронные и асинхронные (несинхронные), коллекторные машины переменного тока и трансформаторы.

В *синхронных машинах* угловая скорость ротора ω_r и угловая скорость магнитного поля ω_c равны. В *асинхронных машинах* угловая скорость ротора не равна угловой скорости поля: $\omega_r \neq \omega_c$. При этом ω_r может быть меньше или больше угловой скорости поля. Направления вращения ротора и поля статора могут быть противоположными.

Коллекторные машины переменного тока отличаются от асинхронных и синхронных машин тем, что имеют механический преобразователь частоты и числа фаз — коллектор, который соединен с обмоткой статора или ротора.

Трансформаторы — электромагнитные преобразователи энергии. В них не происходит преобразования электрической энергии в механическую и обратно, а имеет место преобразование электрической энергии одного вида в другой. Трансформаторы выполняются таким образом, что обмотки не могут перемещаться относительно друг друга.

По режиму работы электрические машины делятся на генераторы и двигатели. В *генераторах* механическая энергия, подводимая к валу машины, преобразуется в электрическую энергию. В *двигателях* электрическая энергия преобразуется в механическую энергию. Одна и та же электрическая машина может работать и двигателем, и генератором. Однако у генераторов и двигателей обычно имеются конструктивные отличия и на заводском щите машины указывается режим работы.

Синхронные машины могут работать в режиме потребления или отдачи в сеть реактивной мощности. Такие машины называются *синхронными компенсаторами*.

Электрические машины, как правило, выполняются с одной вращающейся частью — ротором и неподвижной частью — статором. Когда вращается только ротор, машина имеет одну степень свободы. Такие машины называются одномерными.

Электромагнитный момент в электрических машинах приложен и к ротору, и к статору. Если дать возможность вращаться обоим частям машины, они будут перемещаться в противоположные стороны. У машины, в которой может вращаться и ротор, и статор, — две степени свободы. Это двухмерные машины. В навигационных приборах ротором может быть шар, который вращается двумя статорами, расположенными под углом 90° . Такие машины имеют три степени свободы. В космической электромеханике приходится рассчитывать шестимерные электромеханические системы, в которых статор и ротор имеют три степени свободы.

Электрические машины могут иметь возвратно-поступательное движение. Однако в машинах с возвратно-поступательным движением статор и ротор разомкнуты и магнитное поле отражается от краев, что приводит к искажению поля в воздушном зазоре. Краевой эффект в линейных электрических машинах ухудшает энергетические показатели. Низкие энергетические показатели ограничивают применение электрических машин с возвратно-поступательным движением.

Все электрические машины имеют неподвижную часть — статор и вращающуюся — ротор (рис. 1.15, *а*). Энергия магнитного поля концентрируется в основном в воздушном зазоре — промежутке между статором и ротором.

На рис. 1.15, *а–в* показано, как из обычной машины с цилиндрическим статором и ротором получают машины с сегментным статором и линейные электрические машины. Линейная машина получается при увеличении диаметра

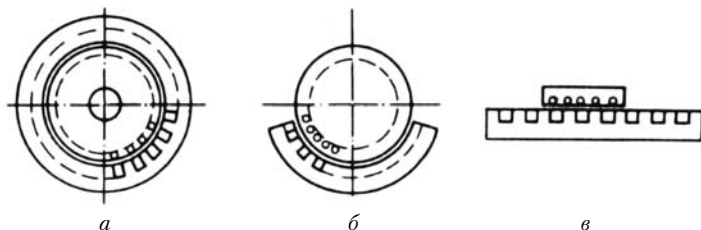


Рис. 1.15. Преобразование машины традиционной конструкции в машину с сегментным статором и линейную машину

ротора сегментной машины до бесконечности. Линейные двигатели находят применение для получения линейных перемещений. В генераторном режиме линейные машины практически не применяются.

Особое место среди ЭП занимают индикаторные машины автоматических устройств. Это различные датчики, преобразователи цифровой информации в угловые и линейные перемещения, приборы времени и другие электромеханические устройства навигационных систем.

Бесчисленны конструктивные исполнения электрических машин, которые работают под водой, в космосе, под землей и в обычных условиях. Почти все индуктивные электрические машины имеют вращательное движение, причем обычно вращается одна часть машины — ротор, а статор неподвижен. Однако находят применение и машины с возвратно-поступательным, колебательным, импульсным движением ротора. Используются машины с жидким и газообразным роторами.

1.4. Основные конструктивные исполнения электрических машин

Независимо от рода питания — постоянного или переменного тока — электрические машины можно разделить на неявнополюсные и явнополюсные. В *неявнополюсных* машинах, т.е. с неявновыраженными полюсами, воздушный зазор равномерный и магнитные сопротивления во всех направлениях одинаковы (рис. 1.16, *а*). Обмотка возбуждения распределена по различным пазам. В *явнополюсных* машинах, т.е. с явновыраженными полюсами и сосредоточенной обмоткой возбуждения, имеются четко выраженные продоль-

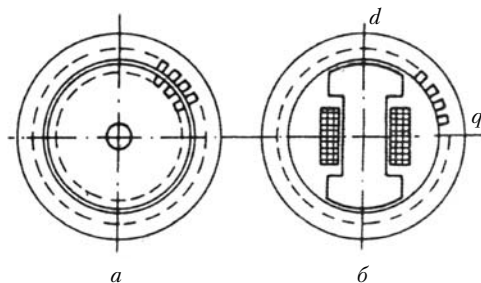


Рис. 1.16. Машины с неявновыраженными (*а*) и явновыраженными полюсами (*б*)

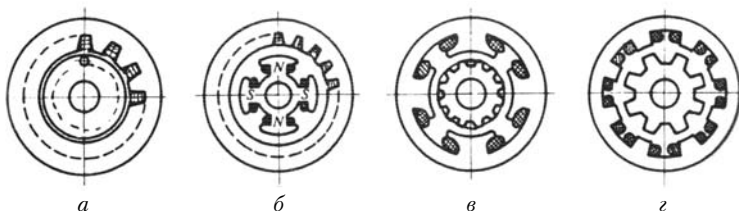


Рис. 1.17. Основные конструктивные исполнения электрических машин

ные и поперечные оси с различными воздушными зазорами и магнитными сопротивлениями (рис. 1.16, б). Сосредоточенная катушечная обмотка возбуждения может располагаться на статоре и роторе.

Наибольшее распространение получили электрические машины с неявновыраженными (рис. 1.17, а) и явновыраженными (рис. 1.17, б, в) полюсами. Асинхронные машины — это чаще всего машины с неявновыраженными полюсами. Синхронные машины могут иметь явновыраженную магнитную систему на роторе (см. рис. 1.17, б). Магнитная система с явновыраженными полюсами на статоре характерна для машин постоянного тока (см. рис. 1.17, в). Явновыраженная конструкция полюсов на статоре и роторе принадлежит индукторным или параметрическим машинам (рис. 1.17, г), в которых преобразование энергии осуществляется за счет периодического изменения магнитного сопротивления воздушного зазора.

В синхронных машинах в роторе замыкается постоянный поток, поэтому ротор турбогенератора выполняется литым, а обмотка возбуждения укладывается в пазы, профрезерованные в бочке ротора.

В машинах постоянного тока (рис. 1.18) литая (или шихтованная) станина 1 является одновременно и магнитопроводом. К станине крепятся главные полюсы 2 с обмотками возбуждения 3 и добавочные полюсы с обмотками. Якорь машины постоянного тока 4 вращается в неподвижном поле, поэтому сталь магнитопровода якоря перемангничивается. Для уменьшения потерь от вихревых потоков магнитопровод якоря выполняется шихтованным. Обмотка якоря 5 подсоединяется к коллектору 6. По коллектору скользят щетки 7, расположенные в щеткодержателях. Остальные обозначения: 8 — вентилятор, 9 — щит подшипниковый, 10 — вал.

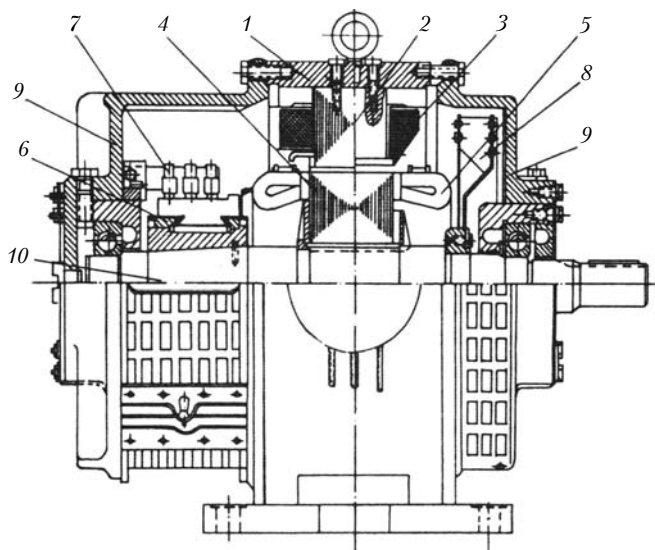


Рис. 1.18. Машина постоянного тока

Обычно ротор находится внутри статора. Иногда ротор располагается снаружи цилиндрического статора. Такие машины называются машинами с внешним ротором. Машины с внешним ротором имеют повышенный момент инерции, их применяют в приводах транспортеров и там, где требуется большой момент инерции.

В некоторых применениях машины постоянного тока могут быть с вращающимися обмотками возбуждения, синхронные машины — с неподвижными обмотками возбуждения. Такие машины принято называть обращенными.

По форме исполнения в соответствии с ГОСТ 2479—79 электрические машины делят на восемь групп, которые, в свою очередь, делятся на 49 видов, включающих 161 форму исполнения. В табл. 1.1 даны наиболее распространенные виды электрических машин.

По ГОСТу осуществляются исполнения по степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, попадания посторонних тел внутрь машины, а также по степени защиты от проникновения воды внутрь машины. Кроме того, выпускаются взрывозащищенные машины, влагостойкие электрические машины для работы при большой влажности, морозостойкие, химостойкие и в тропическом исполнении [17].

Таблица 1.1

Вид машины	Обозначение вида машин по ГОСТу
На лапах с двумя подшипниковыми щитами	M10
На лапах с двумя подшипниковыми щитами и с фланцем на подшипниковом щите	M21, M22
Без лап, с фланцем на подшипниковом щите, фланец со стороны конца вала, центрирующая заточка там же	M30
Без лап, с фланцем на станине, фланец со стороны конца вала, центрирующая заточка там же	M40
Встраиваемые, без станины или со станией, с двумя подшипниковыми щитами и с креплением на образующей наружной поверхности станины	M50
Встраиваемые, без станины и подшипниковых щитов	M53
На лапах с двумя подшипниковыми щитами и одним стоячковым подшипником	M60
На лапах, с одним стоячковым подшипником	M70
На лапах, с двумя стоячковыми подшипниками	M73
Вертикальные большой мощности:	
а) с направляющим подшипником	M80
б) с подпятником, расположенным ниже корпуса ротора (зонтичное исполнение)	M81
в) с подпятником, расположенным выше корпуса ротора (подвесное исполнение)	M82

В конструктивном отношении машины различаются также по способу охлаждения. В машинах с естественным охлаждением циркуляция воздуха осуществляется за счет вентилирующего действия вращающихся частей и конвекции. В машинах с самовентилиацией на валу имеется вентилятор. В обдуваемых закрытых машинах осуществляется принудительное охлаждение только внешней поверхности машины. В продуваемых машинах воздух омывает активные части машины и выбрасывается наружу. Машины с внутренней вентилиацией делятся на машины с аксиальной, аксиально-радиальной и радиальной вентилиацией.

Для охлаждения машины могут применяться воздух, водород, масло и вода. Охлаждение может осуществляться за счет испарения жидкостей. В последнее время широко применяется внутреннее (непосредственное) охлаждение, ког-

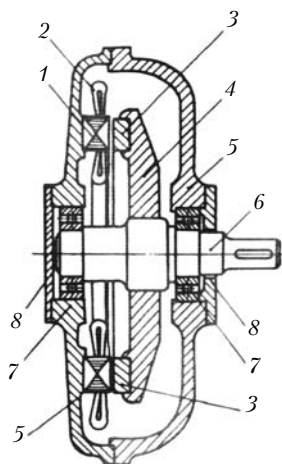


Рис. 1.19. Торцевая электрическая машина:

1 — магнитопровод статора; 2 — обмотка статора; 3 — постоянные магниты; 4 — магнитопровод ротора; 5 — станины; 6 — вал; 7 — подшипники; 8 — крышки подшипников

да охлаждающий агент проходит по специальным каналам внутри проводников [11].

Находят применение торцевые электрические машины, в которых статор и ротор имеют форму дисков (рис. 1.19). Энергия магнитного поля в торцевых машинах концентрируется в промежутке между дисками.

Конструктивные видоизменения индукторных машин весьма разнообразны. Наибольшее распространение получила конструкция индукторной машины с двумя роторами 1 и статорами 2 (рис. 1.20). При сдвиге ротора на 90° общее магнитное сопротивление машины не изменяется и в обмотке возбуждения 3 не наводится переменная составляющая напряжения. При этом с обмоток переменного тока 4, расположенных на полюсах каждого статора, снимается переменное напряжение. Поток возбуждения машины замыкается по корпусу статора 5 и втулке ротора 6, насаженной на вал 7.

Для получения больших постоянных токов (до 100 кА) при низких напряжениях применяются униполярные машины (рис. 1.21). В таких машинах отсутствует коллектор, но они принципиально не могут работать без скользящего контакта, который состоит из щеток 1 и колец 2. Постоянный магнитный поток замыкается по станине 3, массивному ротору 4 и двум магнитным зазорам. Поток возбуждения (показан на рис. 1.21 штриховой линией) создается обмоткой возбуждения 5. Постоянные токи наводятся

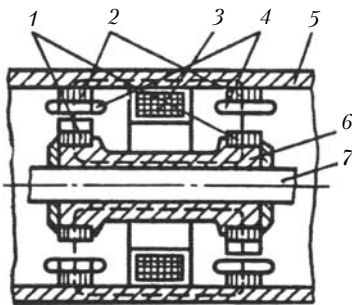


Рис. 1.20. Конструктивное выполнение индукторной машины

в массивном роторе и снимаются щетки. Чтобы уменьшить электрические потери, на роторе делаются пазы, в которые укладываются медные стержни. Медные стержни привариваются к контактным кольцам, образуя на роторе короткозамкнутую обмотку.

В электромагнитных преобразователях — трансформаторах — обмотки располагаются так, чтобы исключить перемещение их относительно друг друга. Переменный поток замыкается по шихтованному магнитопроводу. Для ограничения токов короткого замыкания применяют реакторы, которые представляют собой индуктивную катушку со сталью или без стали (см. гл. 2).

В последние годы для концентрации энергии магнитного поля и хранения ее применяют сверхпроводящие индуктивные накопители. В таких индуктивных катушках в небольших объемах удастся концентрировать энергию до 100 МДж за счет магнитных полей до 5 Тл. В сверхпроводящих индуктивных накопителях активное сопротивление близко к нулю и потери в обмотках отсутствуют.

Созданы турбогенераторы и двигатели со сверхпроводящими обмотками, работающими при температуре, близкой к 4 К и азотным температурам 160 К.

В сверхпроводящих электрических машинах обмотки выполняются из ниобий-титанового сплава или чистого алюминия.

Выше были рассмотрены лишь основные конструкции электрических машин. В специальных машинах видоизменения бесконечны. Более подробно конструкции электрических машин переменного и постоянного тока рассматриваются при изучении соответствующих разделов курса.

В справочнике по электрическим машинам приведено свыше десяти тысяч исполнений и типоразмеров электрических машин [17].

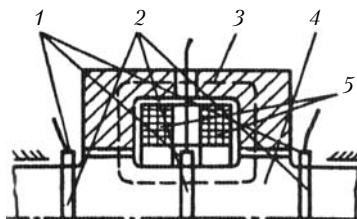


Рис. 1.21. Униполярная электрическая машина

1.5. Законы электромеханики

Электромеханика является одним из разделов физики, в котором рассматривается электромеханическое преобразование энергии. В электромеханических преобразователях

(ЭП) — электрических машинах — осуществляются технические применения электромеханического преобразования энергии.

Электромеханика является фундаментальной наукой, для которой могут быть сформулированы законы. Таких законов, на наш взгляд, три.

Первый закон. Электромеханическое преобразование энергии не может осуществляться с КПД, равным 100%.

Мы не сделаем большой ошибки, если скажем, что окружающий нас мир состоит из преобразователей энергии, которые можно разделить на простые и сложные.

В *простых преобразователях* энергия одного вида полностью преобразуется в энергию другого вида. Примером такого преобразователя может служить электрическая печь, где электрическая энергия полностью преобразуется в тепло.

В *сложных преобразователях* (а их большинство) энергия одного вида преобразуется в энергию двух (реже трех или нескольких) видов. К сложным преобразователям относятся преобразователи световой энергии в электрическую, химической энергии — в механическую, ядерной энергии — в электрическую и др. В сложных преобразователях обычно происходит сопутствующее преобразование энергии в тепло.

Говоря о КПД, следует отметить, что вкладывается в понятие полезного действия. Инженеры, занимающиеся электронагревом, вводят понятие КПД печи, считая, что только часть тепла расходуется на технологический процесс. Поэтому КПД электропечи в этом смысле не равен 100%. В электрических машинах энергия, преобразующаяся в тепло, относится к потерям, и КПД есть отношение электрической мощности, отдаваемой в сеть, к механической (режим генератора) или отношение полезной механической — к электрической мощности, забираемой из сети (режим двигателя).

Электромеханические преобразователи энергии относятся к сложным преобразователям, так как электромеханическое преобразование энергии в них всегда сопровождается преобразованием электрической $P_{эл}$ или механической энергии $P_{мех}$ в тепловую P_t (рис. 1.22).

В самом общем виде ЭП (или электрическую машину) можно представлять как шестиполусник с внутренним сопротивлением $z_{ЭП}$ и двумя электрическими, двумя механическими и двумя тепловыми выводами.

При создании ЭП стремятся уменьшить потери — потоки тепловой энергии, что приводит к уменьшению габаритов и удешевлению электромеханических преобразователей. Созданы электрические машины с КПД, равным 99%, а в трансформаторах достигнут КПД, равный 99,8%. Такие высокие КПД являются исключительным техническим достижением. Следует иметь в виду, что высокие КПД имеют электрические машины большой мощности. В ЭП небольшой мощности КПД может составлять всего несколько процентов, т.е. большая часть механической или электрической энергии в таких машинах преобразуется в тепло.

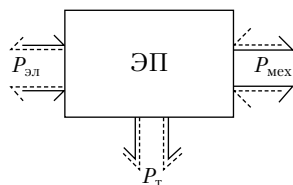


Рис. 1.22. Направления потоков энергии в электрической машине

Для электрических машин, в которых осуществляется электромеханическое преобразование энергии, предложено математическое описание, адекватно отражающее процессы, происходящие в машине. Математические модели — уравнения, описывающие преобразование энергии в электрических машинах, — весьма разнообразны. Наиболее общее математическое описание процессов преобразования энергии в электрических машинах дают дифференциальные уравнения, которые справедливы для переходных и установившихся процессов. При исследовании электрических машин, как и при исследовании других физических объектов, целесообразно работать с математической моделью и реальной машиной.

Уравнения, описывающие преобразование энергии в электрических машинах, не имеют решения, если активные сопротивления, входящие в эти уравнения в виде коэффициентов перед переменными, равны нулю. Если математическая модель не дает решения, то и реальная машина не должна преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно.

Нельзя создать электрическую машину, в которой вся энергия преобразовывалась бы из электрической в механическую или, наоборот, из механической в электрическую, а преобразование энергии в тепло отсутствовало бы. Чтобы не было в электрической машине преобразования энергии в тепло, машина должна быть выполнена без стали, со сверхпроводящими обмотками и без механических потерь. Такое

электротехническое устройство построить можно. Однако оно будет не электромеханическим преобразователем, а накопителем энергии.

Накопители по своей конструкции близки к электрическим машинам. Накопители энергии могут быть выполнены как статические устройства и как вращающиеся машины; примером может служить гироскоп со сверхпроводящими обмотками. Это электрическая машина, которая могла бы вращаться бесконечно долго, так как в ней практически нет потерь. Но если к ее валу приложить момент сопротивления, она остановится. Нормальным состоянием ЭП является вращение, и гироскоп со сверхпроводящими обмотками может вращаться вечно, не создавая электромагнитного момента.

Электромеханика — наука о замкнутых контурах. Электромеханический преобразователь можно представлять как шестиполосник (рис. 1.23) с двумя электрическими выводами, характеризующимися напряжением U и частотой f , с двумя механическими выводами, определяемыми моментом M и частотой вращения — механической частотой n , а также тепловым контуром, характеризующимся количеством тепла Q и температурой t .

При анализе процессов преобразования энергии в электрической машине считают внешние сопротивления электрической, механической и тепловой цепей равными нулю. При этом электрическая сеть считается сетью бесконечной мощности и поэтому изменение режима работы электрической машины не влияет на изменение напряжения и частоты. Нагрев машины не влияет на температуру окружающей среды. Механическая нагрузка на валу обычно считается постоянной.

При исследовании электрических машин нельзя забывать об электрической сети, в которой могут изменяться внутреннее сопротивление, а также частота и напряжение. Машина может работать в ограниченном пространстве, и тем-

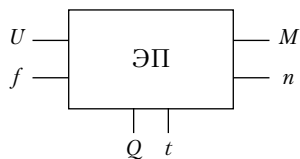


Рис. 1.23. Представление электрической машины в виде шестиполосника

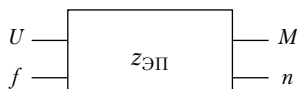


Рис. 1.24. Представление электрической машины в виде четырехполосника

пература среды, окружающей машину, может изменяться. Изменение инерционных масс на валу машины и момента нагрузки также влияет на работу машины.

Нельзя подходить формально к законам электромеханики, так как может показаться, что машины со сверхпроводящими обмотками не будут работать. Это не так. Можно представить электрическую машину без потерь (без стали со сверхпроводящими обмотками), но для того чтобы осуществлялось преобразование энергии в такой машине, необходимо активное сопротивление, которое может быть включено в контуры тока вне машины. Здесь потери вынесены из машины в электромеханическую систему, и в машине со сверхпроводящими обмотками будет происходить электромеханическое преобразование энергии.

В большинстве исследований тепловой контур рассматривается как имеющий бесконечный объем с неизменной температурой. Поэтому электромеханический преобразователь можно представлять как четырехполюсник с внутренним сопротивлением $z_{\text{ЭП}}$ (рис. 1.24), с двумя электрическими выводами напряжением U и электрической частотой f , а также двумя механическими выводами — моментом на валу M и частотой вращения n . Электрическая машина в виде четырехполюсника с двумя электрическими и двумя механическими выводами и внутренним сопротивлением $z_{\text{ЭП}} = 0$ рассматривается при решении задач электромеханики, когда процессы преобразования энергии внутри машины не имеют определяющего значения.

При работе электрической машины в ней выделяется тепловая энергия. Однако можно создать электрическую машину, в которой за счет эффекта Пельтье внутри машины на холодных спаях поглощается тепло и которая не нагревается и даже может охлаждаться. При этом на горячих спаях, расположенных вне машины, выделяется тепловая энергия. К сожалению, существующие спаи проводниковых материалов обеспечивают охлаждение при низких плотностях токов, что приводит к значительному увеличению габаритов машины и снижению энергетических показателей. Этот пример свидетельствует о том, что тепловые контуры, так же как механические и электрические, в электрической машине надо рассматривать как замкнутые.

Второй закон. Все электрические машины обратимы, т.е. они могут работать как в двигательном, так и в генераторном режиме.

Работа электрической машины в двух режимах является важнейшим преимуществом электромеханических преобразователей перед другими преобразователями энергии (паровыми турбинами, дизелями, реактивными двигателями и т.п.). Одна и та же машина может работать и в двигательном, и генераторном режиме. Например, двигатель электровоза при ускорении состава забирает энергию из сети и работает в двигательном режиме, а при торможении — отдает электрическую энергию в сеть, работая в генераторном режиме. Режим работы электрической машины зависит от момента сопротивления на ее валу.

Если электрическая энергия потребляется из сети, электрическая машина работает в режиме двигателя. Если поток механической энергии, поступающей через вал, преобразуется в поток электромагнитной энергии, устанавливается генераторный режим работы.

В индуктивных электрических машинах обмотки статора и ротора связаны магнитным полем. Чтобы осуществлялась связь вращающихся обмоток с неподвижными с помощью переменных или постоянных токов, в воздушном зазоре машины создается вращающееся магнитное поле. Чтобы получить вращающееся поле при наличии постоянного тока, необходимо вращать обмотку, в которой протекает постоянный ток. При определенном расположении обмоток в пространстве и при определенном сдвиге токов во времени относительно друг друга при неподвижных обмотках можно в зазоре машины получить вращающееся поле.

Для создания магнитного поля в машинах переменного тока требуется реактивная мощность. В обмотках машины переменного тока протекают активные и реактивные токи, которые создают вращающееся магнитное поле, а активные составляющие токов определяют активную мощность машины. Реактивная мощность в установившемся режиме может поступать как со стороны статора, так и со стороны ротора или с обоих входов машины одновременно. Направления активных и реактивных потоков энергии независимо от режима работы электрической машины могут совпадать или быть встречными. Это значит, что активная мощность может поступать со стороны статора, а реактивная — со стороны ротора и наоборот.

В ЭП имеет место режим преобразования электрической или механической энергии в тепло. Это режим холостого хода. Синхронные машины, работающие параллельно с се-

тью в режиме холостого хода, называют синхронными компенсаторами.

Активная мощность в двигательном и генераторном режимах изменяет направление, однако поток тепловой энергии, как правило, направления не изменяет. Потери в обычных ЭП необратимы. Однако ЭП настолько многообразны, что существуют специальные ЭП, преобразующие тепло в электрическую и механическую энергию. Их принцип действия основан на изменении магнитной или диэлектрической проницаемости материала, в котором сосредоточена энергия магнитного или электрического поля. При этом изменение температуры должно происходить вблизи точки Кюри.

Одним из следствий первого и второго законов является определение электрических машин как концентраторов энергии. Электромагнитная энергия, распределяясь в бесконечности вдоль линии электропередачи, в индуктивных электрических машинах концентрируется в воздушном зазоре — пространстве между статором и ротором. В трансформаторах энергия концентрируется в магнитопроводе и в пространстве между обмотками, где замыкаются потоки рассеяния.

В сравнительно небольшом объеме воздушного зазора могут концентрироваться огромные мощности. Важно отметить, что в турбогенераторах предельной мощности и в асинхронных машинах единой серии удельная мощность воздушного зазора равна примерно $0,5 \text{ Вт/мм}^3$. С учетом этого проектирование электрических машин можно начинать с расчета объема зазора, а затем рассчитывать обмотки и определять геометрические размеры магнитной системы.

Третий закон. Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга.

Неподвижные относительно друг друга поля ротора и статора в воздушном зазоре машины создают результирующее поле и электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = \omega_c^{-1} P_{\text{эм}}, \quad (1.1)$$

где ω_c — угловая скорость поля; $P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность — мощность магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре.

Поля, неподвижные относительно друг друга, создают $M_{\text{эм}}$, а поля, перемещающиеся в воздушном зазоре относительно

друг друга, создают поток тепловой энергии, косвенно влияя на распределение потоков механической и электрической энергии. Увеличение потерь в машине приводит к снижению КПД.

Обмотки электрических машин выполняются таким образом, что при протекании по ним токов в воздушном зазоре создается вращающееся магнитное поле. При проектировании электрических машин стремятся получить в воздушном зазоре круговое поле, которое содержит только одну гармонику. Такое поле называется также синусоидальным.

В синхронной машине вращающееся поле в большинстве случаев создается обмотками, расположенными на статоре, и его угловая скорость равна ω_c . Ротор вращается с такой же угловой скоростью, что и поле ($\omega_p = \omega_c$), поэтому в обмотке ротора частота $f_2 = 0$ и в ней протекает постоянный ток. Поля статора и ротора в синхронной машине неподвижны относительно друг друга.

В машине постоянного тока обмотка возбуждения расположена на статоре и поле возбуждения неподвижно. В якоре создается вращающееся поле, частота вращения которого равна частоте вращения ротора, а направление вращения поля противоположно вращению ротора. Поэтому поля статора и ротора в машине постоянного тока неподвижны относительно друг друга.

В асинхронных машинах частота тока в роторе

$$f_2 = f_1 s, \quad (1.2)$$

где скольжение (относительная скорость)

$$s = \frac{\omega_c \mp \omega_p}{\omega_c}. \quad (1.3)$$

Поэтому сумма скорости ротора ω_p и скорости поля ротора относительно ротора всегда равна скорости поля ω_c . Если ротор вращается со скоростью, большей ω_c , в ту же сторону, что и поле, созданное токами ротора, поле ротора движется в направлении, обратном вращению ротора, и поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга.

В трансформаторах первичные и вторичные обмотки жестко закреплены на стержнях магнитной системы и частоты напряжений в обмотках одинаковые. Поэтому можно считать, что максимум потока в трехфазном трансформаторе перемещается по стержням с одинаковой частотой относи-

тельно первичной и вторичной обмоток. Представление о неподвижности полей для анализа процессов преобразования энергии в трансформаторах не имеет большого значения.

Электрические и механические явления в большинстве электрических машин настроены в резонанс. В электрических машинах имеется электромеханический резонанс, когда частота сети f_1 и механическая частота вращения n , об/с, связаны соотношением

$$f_1 = pn, \quad (1.4)$$

где p — число пар полюсов.

В двухполюсной машине частота сети и синхронная частота вращения ротора равны друг другу. Электрические машины выполняются таким образом, что волна МДС в воздушном зазоре укладывается целое число раз, и процессы преобразования энергии в двухполюсных и многополюсных машинах протекают лишь с той разницей, что синхронная скорость поля и механическая скорость ротора в многополюсной машине в p раз меньше, чем в двухполюсной.

Электрические машины по своим видам разнообразны, и в емкостных и индуктивно-емкостных машинах неподвижность полей относительно друг друга не имеет такого важного значения, как в индуктивных машинах. Емкостные и индуктивно-емкостные машины наиболее ярко представляют как концентраторы энергии, имеющие электромеханический резонанс.

Электромеханика объединяет и использует все достижения в механике, электродинамике и теплофизике. Как и большинство технических наук, на этих «трех китах» основывается и электромеханика.

Так как электромеханика является частью физики, к электрическим машинам применимы все основные законы физики. К ним в первую очередь относятся законы сохранения энергии, полного тока, закон Ома и др. В основе уравнений, описывающих преобразование энергии в электрических машинах, лежат уравнения Максвелла и Кирхгофа.

1.6. Обобщенная электрическая машина

Из законов электромеханики следует, что все электрические машины имеют общую основу: они преобразуют механическую энергию в электрическую и обратно — электриче-

скую — в механическую. При этом поля ротора и статора неподвижны друг относительно друга.

Электрические машины представляют собой определенную комбинацию в пространстве обмоток, в которых протекают токи, сдвинутые во времени также на определенный угол.

При проектировании стремятся получить в воздушном зазоре круговое вращающееся магнитное поле, которое содержит только одну гармонику. Вращающееся поле может быть создано двухфазной системой токов, если неподвижные обмотки сдвинуты в пространстве на 90° ; трехфазной системой токов — при сдвиге обмоток в пространстве на 120° и токов во времени на 120° . В общем случае вращающееся поле создается m -фазной системой токов при сдвиге обмоток в пространстве на $360^\circ/m$ и токами со сдвигом во времени на $360^\circ/m$. Вращающееся поле может создаваться и постоянным током. При этом обмотка, обтекаемая постоянным током, должна вращаться.

Обмотки возбуждения во всех электрических машинах создают магнитное поле, в котором происходит электромеханическое преобразование энергии, но активная мощность поступает в воздушный зазор со стороны вала или из электрической сети. В установившемся режиме от обмоток возбуждения мощность не отбирается.

Магнитное поле в машинах переменного тока создается реактивными токами, которые также косвенно участвуют в процессе преобразования энергии.

Простейшей схемой электрической машины является двухфазная машина с двумя парами обмоток на статоре

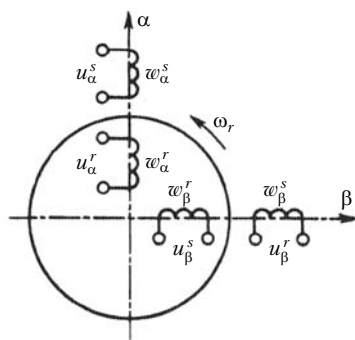


Рис. 1.25. Модель обобщенной машины

и роторе (рис. 1.25). Обмотки статора w_α^s и w_β^s сдвинуты в пространстве и в магнитном поле на 90° и обмотки ротора w_α^r и w_β^r сдвинуты относительно друг друга на 90° . К обмоткам статора приложены соответственно напряжения u_α^s и u_β^s , а к обмоткам ротора — напряжения u_α^r и u_β^r .

Чтобы в воздушном зазоре двухфазной машины получить вращающееся магнит-

ное поле, необходимо к обмоткам статора или ротора подвести напряжения, сдвинутые во времени на 90° . Тогда в обмотках будут протекать токи, сдвинутые во времени на 90° , и в воздушном зазоре появится вращающееся магнитное поле. Исходя из третьего закона электромеханики — неподвижности относительно друг друга полей статора и ротора — электромеханическое преобразование энергии будет возможным при определенном соотношении угловых скоростей

$$\omega_c = \omega_p \pm \omega_{п,р}, \quad (1.5)$$

где ω_c , ω_p , $\omega_{п,р}$ — угловые скорости поля статора, ротора и поля ротора относительно ротора.

При этом условии в воздушном зазоре магнитные поля ротора и статора неподвижны относительно друг друга. При изменении ω_c или ω_p изменяется частота токов в роторе (формула (1.2)), но поля статора и ротора остаются неподвижными относительно друг друга.

В воздушном зазоре машины (см. рис. 1.25) круговое поле будет только при определенных условиях. Чтобы поле было синусоидальным, необходимо на электрических выводах иметь синусоидальное напряжение, а машина должна быть идеальной.

В идеальной электрической машине воздушный зазор равномерный и гладкий (в машине нет пазов на роторе и статоре), обмотки выполнены в виде токовых слоев, создающих синусоидальное распределение МДС в воздушном зазоре. При этом машина не насыщена, магнитная проницаемость стали μ равна бесконечности. Машина симметричная, т.е. ее обмотки, магнитная система, воздушный зазор симметричны по осям α и β . Кривизна воздушного зазора не учитывается — поле плоскопараллельное.

Круговое поле в зазоре имеет место в идеальной машине. В реальных машинах из-за несимметрии машины, несинусоидального распределения МДС, наличия пазов на статоре и роторе, насыщения и ряда других причин в воздушном зазоре машины имеется бесконечный спектр гармоник поля. Высшие гармоники оказывают сложное влияние на процессы преобразования энергии в электрической машине, поэтому вначале необходимо выяснить, как работает машина при наличии одного поля в зазоре.

Двухфазная двухполюсная идеальная машина (см. рис. 1.25) называется обобщенной электрической машиной.

Обобщенной она именуется потому, что к ней приводятся процессы преобразования энергии во всех основных типах индуктивных электрических машин.

В основе общей теории электрических машин лежат уравнения электромеханического преобразования энергии, которые адекватно описывают процессы в реальной машине.

Математические модели электрических машин получили широкое распространение. Математическое моделирование процессов преобразования энергии в электрических машинах позволило углубиться в сложнейшие проблемы электромеханики [7].

Основателем обобщенной теории электрических машин является Г. Крон, который в 1930-х гг. предложил уравнения обобщенной машины. В последние десятилетия благодаря применению ЭВМ усилиями многих ученых-электромехаников обобщенная теория электрических машин получила дальнейшее развитие. Без преувеличений можно сказать, что большинство успехов в теории и практике электромашиностроения связано с математической теорией электрических машин [7, 15].

Рассмотрим двухполюсную машину, так как процессы преобразования энергии в симметричных многополюсных машинах можно свести к двухполюсной машине. На рис. 1.26 дана развертка магнитной системы четырехполюсной машины $2p = 4$, число пар полюсов в этой машине $p = 2$. На двух полюсных делениях 4τ этой машины форма магнитной индукции B повторяется. Поэтому для симметричной машины можно подсчитать ЭДС, мощность и другие показатели в зоне двух полюсов, а затем, чтобы получить эти показатели для всей машины, надо их умножить на число пар полюсов p .

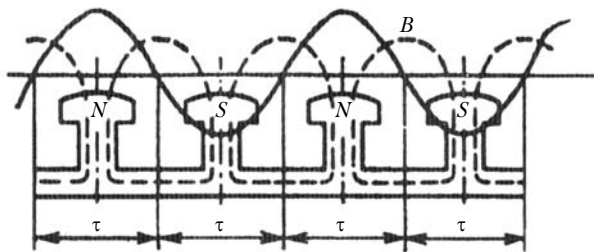


Рис. 1.26. Процессы преобразования энергии в многополюсной машине

В многополюсных машинах синхронная частота вращения поля, об/мин, в p раз меньше:

$$n_c = \frac{60f}{p}, \quad (1.6)$$

где f — частота сети. При $f = 50$ и $p = 1$ $n_c = 3000$ об/мин, при $p = 2$ $n_c = 1500$ об/мин и т.д.

При изучении электрических машин пользуются понятием электрического угла, который связан с геометрическим углом следующим соотношением:

$$\alpha = p\alpha', \quad (1.7)$$

где α — электрический угол; α' — геометрический угол. Например, $\alpha = 360^\circ$ в четырехполюсной машине ($p = 2$) соответствует половине окружности, а в шестиполюсной ($p = 3$) — одной трети окружности и т.д.

В общей теории рассматривается двухфазная электрическая машина, так как симметричные трехфазные многофазные обмотки приводятся двухфазным, а минимальное число уравнений напряжений для двухфазной машины — четыре.

Основные типы электрических машин можно свести к обобщенной электрической машине, представляющей собой комбинацию двух пар обмоток, перемещающихся относительно друг друга (см. рис. 1.25).

Асинхронная (несинхронная) машина из схемы обобщенной машины получается, когда к обмоткам статора w_α^s и w_β^s подводятся синусоидальные напряжения с частотой f_1 , сдвинутые во времени на 90° . В обмотках ротора при этом проходят токи с частотой $f_2 = f_1 s$, которые создаются приложенными к ротору напряжениями или наводятся токами обмоток статора. В асинхронной машине угловая скорость ротора $\omega_p \neq \omega_c$, а поля ротора и статора неподвижны относительно друг друга, так как сумма угловых скоростей ротора и поля ротора относительно ротора равна ω_c .

Синхронную машину можно получить из модели обобщенной машины, если подвести к обмоткам статора переменное напряжение, а к обмоткам ротора — постоянное или, наоборот, к статору — постоянное, а к обмоткам ротора — переменное напряжение. При этом $\omega_p = \omega_c$, т.е. поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга. Если постоянное напряжение подводится к статорным обмоткам, по ротору поле движется в сторону, противоположную направлению ротора, и поля статора и ротора неподвижны отно-

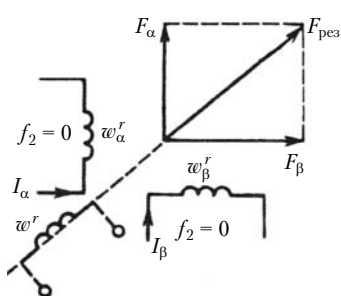


Рис. 1.27. Результирующая МДС двух обмоток, обтекаемых постоянным током

$= \sqrt{2}$, т.е. при увеличении объема меди в 2 раза $F_{\text{рез}}$ увеличивается всего в $\sqrt{2}$ раз.

В машинах постоянного тока в обмотке якоря протекает многофазный переменный ток, преобразованный коллектором — механическим преобразователем частоты (ПЧ) из постоянного тока. Если привести многофазную систему к двухфазной, получим схему машины постоянного тока (рис. 1.28). Как и в синхронной машине, поле якоря вращается относительно якоря в противоположную сторону. При $\omega_p = \omega_c$ поле якоря неподвижно относительно обмотки возбуждения и неподвижной системы координат. В синхронных машинах и машинах постоянного тока скольжение равно нулю.

Коллектор можно заменить преобразователем частоты на полупроводниковых приборах, на герконах или на других каких-либо элементах. В этом случае процессы преобразования энергии в воздушном зазоре принципиально не изменяются, но при наличии коллектора частота жестко связана со скоростью ω_p , а при наличии полупроводникового преобразователя можно создать гибкую обратную связь между f_2 и ω_p . По роду питания машина с коммутатором на полупроводниковых приборах — это машина постоянного тока. Исторически сложилось несколько названий для таких машин — вентильные, машины с полупроводниковыми коммутаторами, бесконтактные машины постоянного тока и др.

В коллекторных машинах переменного тока в обмотках статора и ротора проходят переменные токи, а преобразователь частоты работает в режиме преобразования перемен-

сительно неподвижной системы координат.

При питании обмоток постоянным током достаточно иметь одну обмотку возбуждения, у которой результирующая МДС равна геометрической сумме МДС каждой обмотки (рис. 1.27): $F_{\text{рез}} = \sqrt{F_\alpha^2 + F_\beta^2}$. Выполнять одну обмотку возбуждения w^r вместо двух w_α^r и w_β^r выгоднее, так как при этом требуется примерно в 1,4 раза меньше меди. Например, если $F_\alpha = F_\beta = 1$, $F_{\text{рез}} =$

ного тока частоты сети в переменный ток частоты скольжения (рис. 1.29). Как и во всех электрических машинах, поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга. Эти машины могут быть одно-, трех- или многофазными; обмотки статора и ротора могут соединяться последовательно или параллельно или иметь магнитную связь.

Преобразователь частоты при питании от сети переменного тока работает в более тяжелых условиях, чем в режиме преобразования постоянного тока в переменный. В коллекторных машинах переменного тока это в первую очередь сказывается на коммутации и проявляется в большем искрении под щетками.

Из схемы обобщенной машины при скорости ротора $\omega_r = 0$ можно получить электромагнитный преобразователь — трансформатор. При этом достаточно рассматривать отдельно пару обмоток на статоре и роторе по оси α или β , так как при неподвижном роторе отсутствует связь между обмотками, смещенными в пространстве на 90° . Хотя в трансформаторах происходит только электромагнитное преобразование энергии, они относятся к электрическим машинам как из-за общности уравнений, так и из-за близкой технологии изготовления.

В электромагнитных преобразователях, так же как и в ЭП, активная мощность может поступать из первичной обмотки во вторичную или, наоборот, из вторичной в первичную.

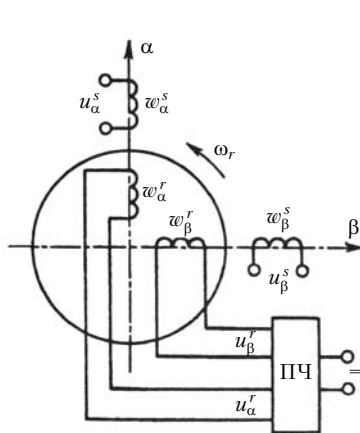


Рис. 1.28. Схема машины постоянного тока

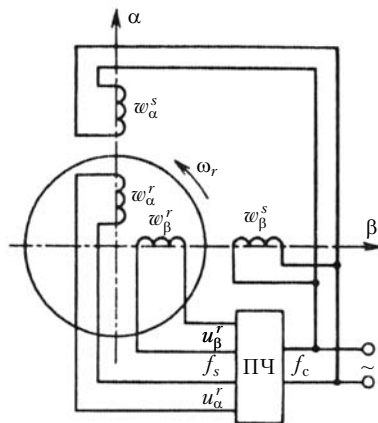


Рис. 1.29. Схема коллекторной машины переменного тока

При этом реактивная мощность может поступать из первичной или вторичной обмотки.

Из анализа обобщенной машины следует, что, несмотря на существенные отличия в конструкции и системе питающих напряжений, все электрические машины объединяет одно общее — они представляют собой электромеханические преобразователи. Когда электрическая машина не преобразует электрическую энергию в механическую или механическую в электрическую, она является электромагнитным преобразователем. Одна и та же электрическая машина может работать как синхронная и асинхронная, с преобразователем частоты от сети постоянного тока и переменного тока, а также как электромагнитный преобразователь — трансформатор.

1.7. Бесконечный спектр гармоник поля.

Обобщенный электромеханический преобразователь

Для понимания процессов преобразования энергии необходимо представлять, как изменяется форма поля в воздушном зазоре машины. Представляя в первом приближении форму поля в зазоре плоскопараллельной, можно считать, что поле изменяется от кругового (синусоидального) до несинусоидального, состоящего из бесчисленного спектра высших гармоник.

Круговое поле в воздушном зазоре может быть только в идеальной электрической машине. В реальных машинах в зазоре поле несинусоидальное. Несинусоидальное поле можно представить как результат наложения бесконечного числа высших гармоник. Имея форму поля в воздушном зазоре, можно разложить ее в гармонический ряд и определить амплитуду первой гармоники и амплитуды и частоты высших гармоник индукции. Одна часть высших гармоник вращается в сторону вращения основной гармоники, а другая — в противоположную сторону. Частоты вращения высших гармоник могут равняться и быть ниже или выше частоты вращения основной гармоники. Амплитуды и фазы высших гармоник изменяются при изменении нагрузки, напряжения и частоты.

Существует много причин, вызывающих искажение поля и появление в зазоре высших гармоник. Высшие гармоники принято делить на временные и пространственные. К временным гармоникам относятся те гармоники, которые

попали в воздушный зазор машины извне. Пространственные гармоники появляются в зазоре за счет особенностей конструкции и нелинейностей параметров машины.

Деление высших гармоник на временные и пространственные сложилось исторически и является не совсем удачным, но для изменения этой классификации время еще не наступило.

Электрическую машину можно рассматривать как четырехполюсник, а если учитывать и тепловые выводы, то как шестиполюсник (см. рис. 1.23). Таким образом, временные гармоники могут попасть в машину со стороны электрических, механических и тепловых входов.

Временные гармоники в воздушном зазоре двигателя появляются за счет несинусоидальности напряжения на выводах двигателя, которое может возникнуть в двигателе после предвключенных нелинейных элементов (реакторов, полупроводниковых приборов и др.), а также за счет искажения формы напряжения сети. Если в питающем напряжении содержится постоянная составляющая, то в спектре гармоник поля наряду с нечетными гармониками создается бесконечный спектр четных гармоник поля.

Причинами появления временных гармоник в переходных режимах являются также несимметрия и нелинейное изменение амплитуды и частоты напряжения.

Форма поля в воздушном зазоре совпадает с формой фазного напряжения для идеальной машины, когда структура машины не вносит в зазор пространственных гармоник и индукция в воздушном зазоре повторяет форму напряжения.

Максимальные амплитуды высших гармоник имеют место при прямоугольном напряжении питания, в этом случае амплитуда 3-й гармоники равна $1/3$ амплитуды 1-й гармоники, 5-й — $1/5$ и v -й — $1/v$. При других формах питающего напряжения амплитуды высших гармоник определяются из разложения несинусоидальной периодической ЭДС в тригонометрический ряд Эйлера — Фурье.

Механические выводы двигателя (см. рис. 1.23) также являются источником появления высших гармоник поля в воздушном зазоре. При нелинейном изменении момента сопротивления и частоты вращения в зазоре появляются высшие гармоники. Если мощность сети, к которой подключена электрическая машина, соизмерима с мощностью машины, то гармоники, появившиеся за счет ударной на-

так как выполнить синусоидальное распределение витков в зубцовой зоне машины практически невозможно.

Направления вращения полей высших пространственных гармоник МДС зависят от числа фаз обмоток.

В трехфазных симметричных обмотках возникают гармоники

$$\nu = 6n \pm 1, \quad (1.9)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$, причем гармоники $6n + 1$ (7, 13, 19-я...) вращаются с частотой в 7, 13, 19... раз меньше, чем основная, и в ту же сторону, что и 1-я. Гармоники $6n - 1$ (5, 11, 17-я...) вращаются с частотой в 5, 11, 17... раз меньшей и в сторону, противоположную вращению основной гармоники.

Для двухфазных симметричных обмоток

$$\nu = 4n \pm 1. \quad (1.10)$$

Гармоники $4n + 1$ (5, 9, 13-я...) вращаются в ту же сторону, что и 1-я, а гармоники $4n - 1$ (3, 7, 11-я...) — в сторону, противоположную основной волне.

На характеристики электрической машины большое влияние оказывают также множество зубцовых гармонических. В электрических машинах обмотки якоря расположены в пазах. Поэтому из-за неравномерной проводимости воздушного зазора характер поля в воздушном зазоре определяется как распределением МДС, так и проводимостью воздушного зазора.

В ненасыщенной машине при синусоидальном распределении МДС, при наличии зубцов на статоре или роторе распределение результирующей магнитной индукции в зазоре $B_{\text{рез}}$ искажается за счет появления зубцовых гармоник B_z (см. рис. 1.72). Результирующую кривую индукции можно представить как сумму 1-й гармоники индукции B_m и зубцовой гармонической B_z .

В рассматриваемом случае при гладком статоре или роторе полюсное деление зубцовой гармонической τ_z определяется числом зубцов статора или ротора и диаметром статора или ротора: $\tau_z = \pi D/z$. Амплитуда зубцовой гармоники зависит от степени раскрытия паза и воздушного зазора.

При наличии пазов на статоре и роторе картина поля в зазоре усложняется. Приближенно можно считать, что в зазоре будут иметь место два сорта зубцовых гармоник. Одни получаются при гладком статоре и наличии зубцов на роторе, а другие — при гладком роторе и наличии зубцов на

статоре. В насыщенной машине картина поля в зазоре резко усложняется и определение амплитуд зубцовых гармоник затрудняется.

На амплитуду зубцовых гармоник оказывает влияние соотношение чисел пазов статора и ротора. При некоторых соотношениях появляются значительные вибрации и шум. Для трехфазных асинхронных машин к этим соотношениям относятся

$$z_1 - z_2 = 0, 1, 2, 3, 4; \quad (1.11)$$

$$z_1 - z_2 = p, p \pm 1; \quad (1.12)$$

$$z_1 = z_2 = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, 2p \pm 3, 2p \pm 4; \quad (1.13)$$

$$z_1 - z_2 = 3p, \quad (1.14)$$

здесь z_1 — число пазов на статоре; z_2 — число пазов на роторе.

Чтобы уменьшить амплитуды зубцовых гармоник, применяют скос пазов на одно зубцовое деление (см. рис. 1.74). При таком скосе ЭДС в витке компенсируются и токи от зубцовых гармоник уменьшаются. Скос пазов можно выполнять как на роторе, так и на статоре. Если ток в роторе или статоре от зубцовой гармоники приближается к нулю, момент от зубцовой гармоники также равен нулю.

Зубцовые гармоники имеют ту же частоту, что и основная, а полюсное деление у них меньше: $\tau_z = \tau/v$, где v — номер зубцовой гармоники. Поэтому частота вращения зубцовых гармоник в v раз меньше частоты вращения основной гармоники.

Подбирая соотношения между числами пазов на роторе и статоре, выбирая укорочение шага обмотки, раскрытие и скос пазов, можно уменьшить амплитуды пространственных гармоник или, наоборот, выделить одну из высших гармоник, обеспечив ей главенствующее положение в спектре гармоник. В этом случае основной — 1-й гармоникой — является высшая пространственная гармоника, так как ее амплитуда самая большая по отношению к другим. Двигатели, работающие на высших пространственных гармониках, называются редукторными. Редукторные двигатели тихоходные и применяются вместо многополюсных машин или двигателей с механическим редуктором.

Пространственные гармоники возникают в зазоре электрической машины также из-за нелинейностей параметров — коэффициентов перед переменными в уравнениях электромеханического преобразования энергии. Индуктив-

ные сопротивления зависят от насыщения, активные сопротивления изменяются за счет вытеснения тока, а в некоторых приводах изменяется и момент инерции. Нелинейные изменения параметров образуют в зазоре соответствующие спектры гармоник.

Технологические факторы также являются причиной появления высших гармоник в воздушном зазоре. К технологическим факторам относятся: неравномерность воздушного зазора за счет эксцентриситета статора и ротора, конусность ротора, несоосность статора и ротора и другие, связанные с технологией изготовления машины.

В электрических машинах есть также гармоники комбинационных частот. В нелинейных системах, а электрическая машина — система нелинейная, достаточно иметь две гармоники, чтобы появились спектры гармоник комбинационных частот. Влияние комбинационных частот на характеристики машин изучено недостаточно, так как определяющее влияние имеют гармоники МДС и высшие зубцовые гармоники.

Высшие гармоники оказывают влияние на работу электрической машины, ухудшая энергетические показатели в результате возникновения добавочных потерь и паразитных моментов. Если в статоре и роторе имеются возможности для протекания токов, обеспечивающих неподвижность относительно друг друга полей ротора и статора, то возникает электромагнитный момент от пары высших гармоник.

В асинхронной машине с короткозамкнутым ротором могут возникнуть моменты от всех гармоник, существующих в воздушном зазоре. Высшие гармоники проявляются особенно сильно при пуске машины. При этом для каждой пространственной гармоники наступает момент, когда частота вращения ротора равна частоте вращения поля и ротор может «застрять» на этой скорости под влиянием синхронного момента от одной из пространственных гармоник.

Высшие гармоники могут иметь, так же как и 1-я гармоника, прямую и обратную составляющие, что создает дополнительно новые множества гармоник.

Среди бесконечного числа гармоник только некоторые оказывают влияние на характеристики электрической машины, так как большое число гармоник имеет бесконечно малые амплитуды. Поэтому при исследовании влияния на процессы преобразования энергии рассматриваются лишь немногие гармоники, имеющие наибольшие амплитуды.

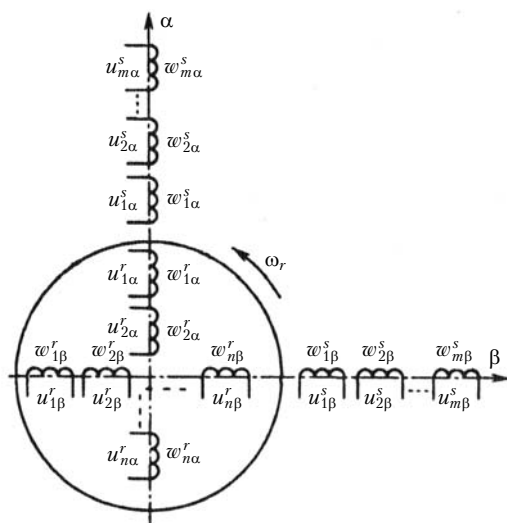


Рис. 1.30. Обобщенный электромеханический преобразователь

Чтобы разобраться в сложнейших взаимодействиях гармоник при бесконечном их спектре в воздушном зазоре, необходимо иметь математическую модель. Такой моделью является обобщенный ЭП. Обобщенный ЭП — это идеализированная двухполюсная двухфазная электрическая машина с m обмотками на статоре по осям α и β и n обмотками на роторе по осям α и β (рис. 1.30). Идеализированная электрическая машина — это машина ненасыщенная, с синусными обмотками и гладким воздушным зазором. Она отличается от обобщенной электрической машины (см. параграф 1.6) наличием m обмоток на статоре и n обмоток на роторе, к которым могут подводиться напряжения с различными частотами и амплитудами. Здесь рассматривается двухфазная машина, но предполагается, что симметричные многофазные многополюсные машины могут быть приведены к двухфазной двухполюсной машине. Неподвижные координаты α , β модели взяты как наиболее распространенные.

В обобщенном ЭП при круговом поле в воздушном зазоре достаточно иметь две пары обмоток на статоре и роторе (см. рис. 1.25). При бесконечном числе гармоник поле в воздушном зазоре можно сформировать, подводя к каждой паре обмоток на статоре или роторе синусоидальные напряжения соответствующих частот. Имея генераторы гармоник, можно задавать соответствующие направления вращения

гармоникам и их фазы. Таким образом, модель обобщенного ЭП позволяет сформировать в зазоре поле любой формы.

На рис. 1.30 каждая обмотка имеет обозначение, показывающее ее принадлежность к оси α или β , порядковый номер, а также расположение ее на роторе или на статоре. Здесь $w_{1\alpha}^s, w_{2\alpha}^s, \dots, w_{m\alpha}^s; w_{1\alpha}^r, w_{2\alpha}^r, \dots, w_{n\alpha}^r$ — обмотки статора и ротора по оси α ; $w_{1\beta}^s, w_{2\beta}^s, \dots, w_{m\beta}^s; w_{1\beta}^r, w_{2\beta}^r, \dots, w_{n\beta}^r$ — обмотки статора и ротора по оси β ; $u_{1\alpha}^s, u_{2\alpha}^s, \dots, u_{m\alpha}^s; u_{1\alpha}^r, u_{2\alpha}^r, \dots, u_{n\alpha}^r$ — напряжения, приложенные к обмоткам статора и ротора по оси α ; $u_{1\beta}^s, u_{2\beta}^s, \dots, u_{m\beta}^s; u_{1\beta}^r, u_{2\beta}^r, \dots, u_{n\beta}^r$ — напряжения, приложенные к обмоткам статора и ротора по оси β .

Модель обобщенного ЭП — математическая модель. Поэтому на одной оси могут находиться обмотки, не имеющие связи с другими обмотками, расположенными на той же оси. При записи уравнений в этом случае взаимные индуктивности равны нулю. Принятое допущение о том, что машина ненасыщена, позволяет применять принцип наложения. Поле в воздушном зазоре на модели обобщенного электро-механического преобразователя энергии можно формировать, подводя к обмоткам напряжения различных амплитуд и частот, сдвинутых по фазе относительно друг друга. Если исследуемая машина имеет несколько обмоток по осям, то в математической модели эти обмотки имеют индуктивные связи.

Из модели обобщенного ЭП можно получить математические модели почти всех электрических машин. Например, однофазный асинхронный двигатель, имеющий одну обмотку (w_s) (рис. 1.31), а в зазоре — пульсирующее поле, представляется математической моделью, состоящей из двух пар обмоток на статоре и роторе (рис. 1.32). Обмотки $w_{1\alpha}^s$ и $w_{1\beta}^s$ создают прямое поле. При моделировании к ним подводятся напряжения $u_{1\alpha}^s = U_m \sin \omega t$, $u_{1\beta}^s = U_m \cos \omega t$. К обмоткам $w_{2\alpha}^s$ и $w_{2\beta}^s$ подводятся напряжения $u_{2\alpha}^s = U_m \cos \omega t$, $u_{2\beta}^s = U_m \sin \omega t$ и в зазоре создается обратное поле. Если ротор короткозамкнутый, $U_{1\alpha}^r, U_{1\beta}^r, U_{2\alpha}^r$ и $U_{2\beta}^r$ равны нулю.

Хотя конструктивно однофазный асинхронный двигатель — машина простая, его математическая модель значительно сложнее трехфазного

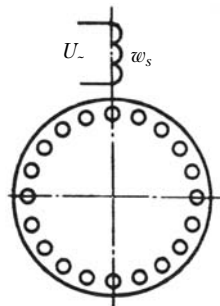


Рис. 1.31. Одно-
фазный двигатель
с короткозамкнутым
ротором

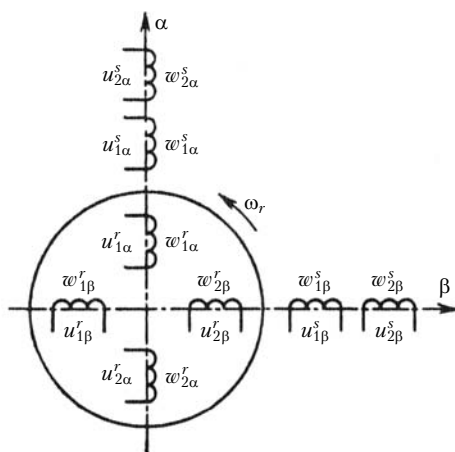


Рис. 1.32. Математическая модель однофазного двигателя

асинхронного двигателя, так как в воздушном зазоре однофазного двигателя два поля (прямое и обратное), а в трехфазном двигателе в зазоре — одно.

Модель обобщенного ЭП хотя и является общей для большинства электрических машин, все же не охватывает многих случаев электромеханического преобразования энергии и является промежуточной. Математическая модель электрической машины усложняется, если считать, что машина имеет две, три и n степеней свободы, т.е. если рассматривать процессы при вращающихся роторе и статоре или сферическом роторе. В емкостных и индуктивно-емкостных электрических машинах изменяется вид уравнений и растет их сложность.

Для обобщенного ЭП, обеспечивающего возможности для моделирования бесконечного спектра гармоник поля в воздушном зазоре, предложены уравнения электромеханического преобразования энергии, которые описывают процессы преобразования энергии почти во всех электрических машинах. Математические модели обобщенного электромеханического преобразователя для различных случаев, встречающихся в практике электромашиностроения, рассматриваются в спецкурсах [7].

Электромеханическое преобразование энергии происходит в воздушном зазоре электрической машины — в пространстве, где сосредоточена энергия магнитного поля. Поэтому изучение магнитного поля машины имеет важное значение

для понимания процессов преобразования энергии в электрических машинах. Магнитное поле машины создается токами, протекающими в обмотках машины. На формирование поля оказывает определенное влияние окружающая среда.

1.8. Магнитное поле машины

Для развития теории электрических машин имели решающее значение работы М. Фарадея и его физические представления о магнитном поле. Фарадей представлял магнитное поле как пространство, заполненное магнитным потоком, который состоит из замкнутых силовых линий. При этом деформации, тяжения силовых линий создают пондеромоторные (электродинамические) силы, которые непосредственно участвуют в электромеханическом преобразовании.

В основе уравнений электромеханического преобразования энергии лежат работы Д. Максвелла, который облек в математическую форму представления Фарадея.

По магнитной индукции и напряженности поля электрической машины можно определить параметры и другие показатели, интересующие исследователя. Однако расчет поля машины может быть проведен только приближенно. Определение параметров и характеристик электрических машин требует большого времени ЭВМ, и в настоящее время используются в основном частичные программы для расчета отдельных показателей машины.

На рис. 1.33 представлено распределение магнитных потоков в четырехполюсном асинхронном двигателе при нагрузке. Силовые линии поля деформируются и распределяются в участках магнитной системы неравномерно. Картина поля на одном полюсном делении явнополюсной синхронной машины представлена на рис. 1.34.

Картина поля в машине зависит от нагрузки, приложенного напряжения, режима работы и геометрии магнитной системы. Форма поля непрерывно

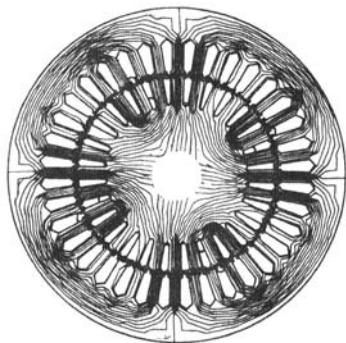


Рис. 1.33. Магнитное поле четырехполюсного асинхронного двигателя при нагрузке

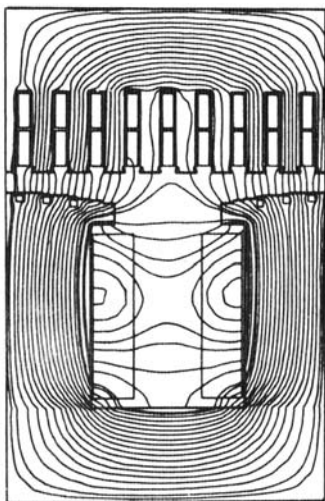


Рис. 1.34. Магнитное поле явнополюсной синхронной машины

Связь между индукцией и напряженностью поля определяется зависимостью

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}, \quad (1.17)$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды.

Так как силовые линии магнитного поля замкнуты, то

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (1.18)$$

что свидетельствует о том, что силовые линии магнитного поля не имеют «стоков» и «источков».

Уравнения (1.15)–(1.18) позволяют аналитически найти магнитное поле лишь для ограниченного круга задач с простейшими граничными условиями.

Магнитные поля в электрических машинах значительно сложнее поля, представленного на рис. 1.35. Обычно в машинах поле концентрируется в воздушном зазоре и в его создании участвуют несколько контуров с токами. Обмотки, как правило, располагаются в пазах, а магнитный по-

изменяется, отражая все события, происходящие в машине. Расчет магнитного поля состоит из определения плотности магнитного потока, т.е. магнитной индукции — вектора, направление которого в каждой точке поля совпадает с направлением силовых линий поля (см. рис. 1.33, 1.34).

Из уравнений Максвелла для магнитного поля вектор напряженности равен

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}. \quad (1.15)$$

Считая, что плотность тока J равномерно распределена по сечению проводника S , имеем

$$J = \frac{I}{S}. \quad (1.16)$$

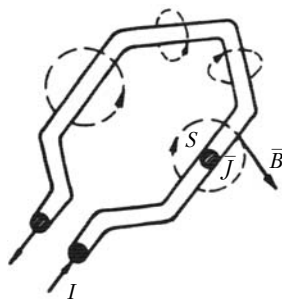


Рис. 1.35. Магнитное поле витка с током

ток замыкается как по стали, так и по воздуху, вокруг лобовых частей обмоток.

Для реальных областей электрических машин со сложными формами магнитных сердечников и контуров с токами при расчете поля приходится идти на ряд допущений, связанных с формой поверхностей, с распределением токов, со свойствами сред и законами движения.

Для безвихревого ($\text{rot } \vec{H} = 0$) характера поля удобно ввести понятие скалярного магнитного потенциала φ_m . При этом

$$\vec{H} = -\text{grad } \varphi_m. \quad (1.19)$$

Для магнитного потенциала справедливо уравнение Лапласа

$$\nabla^2 \varphi_m = \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_m}{\partial z^2} = 0. \quad (1.20)$$

В безвихревом магнитном поле в электрических машинах большая часть граничных условий является условиями Дирихле, что облегчает решение при использовании приближенных методов. Результатом расчета поля являются составляющие напряженности поля по трем осям

$$H_x = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial x}; \quad H_y = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial y}; \quad H_z = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial z}, \quad (1.21)$$

по которым с использованием равенства $B = \mu_\alpha H$ находят составляющие вектора индукции, потоки и потокоцепления. Единица магнитного потенциала — ампер, и магнитный потенциал соответствует МДС. Функция потока в потенциальном поле соответствует магнитному потоку.

При расчете вихревых электромагнитных полей используется понятие векторного магнитного потенциала \vec{A} :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}. \quad (1.22)$$

Совместное решение уравнений (1.14)—(1.17) приводит к уравнению Пуассона

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_\alpha \vec{J}. \quad (1.23)$$

Циркуляция векторного потенциала по контуру оказывается равной магнитному потоку через поверхность, опирающуюся на этот контур. Уравнение (1.22) разбивается в трехмерной задаче на три отдельных уравнения, записанных в проекциях на координатные оси. В электрических ма-

шинах обычно рассматривается двухмерная плоская картина поля с одной, например, составляющей тока I_z по оси z .

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu_\alpha J_z. \quad (1.24)$$

В этом случае векторный магнитный потенциал приобретает смысл магнитного потока на единицу длины в направлении z . Составляющие вектора индукции по осям x и y равны

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (1.25)$$

Для нахождения магнитного поля используются методы подобию, физического и математического моделирования [7]. Значительную роль в решении полевых задач играют конформные преобразования областей решения, при которых сложные граничные условия претерпевают изменения и существенно упрощаются. Решение уравнения Лапласа находится для относительно простых зон и далее переносится в исходную область. Методы конформного преобразования развиты в основном для безвихревых полей. Ряд задач для вихревого поля решается методами интегральных уравнений.

В последние десятилетия быстро развивались приближенные численные приемы расчета поля, основанные на методах конечных разностей и конечных элементов. Быстродействующие ЭВМ дают возможность получить решение при расчете поля машины с затратой сравнительно большого машинного времени. Недостатками этих методов являются невозможность получить общее выражение для решения и необходимость повторять решения при изменении любых факторов, влияющих на поле. Но все возрастающие возможности вычислительной техники компенсируют это неудобство.

Важное уравнение Максвелла связывает вектор электрической напряженности \vec{E} с магнитной индукцией:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (1.26)$$

В интегральном виде оно позволяет перейти к выражению для ЭДС контура

$$E = \int_S -\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right) d\vec{S} + \oint_l [\vec{V} \cdot \vec{B}]_l dl. \quad (1.27)$$

Векторы магнитной индукции и напряженности дают исчерпывающую информацию о магнитном поле и, следовательно, обо всех интегральных величинах (токах, ЭДС, напряжениях, силах и моментах) на выводах машины. Наиболее существенным параметром является индуктивность L , вычисляемая как отношение мгновенных значений потоко-сцепления Ψ , созданного током i , к самому току:

$$L = \frac{\Psi}{i}. \quad (1.28)$$

Если ток и потоко-сцепление принадлежат одной и той же обмотке или проводнику, индуктивность называется самоиндуктивностью, если разным — взаимной индуктивностью. Для поля, описываемого уравнением Лапласа, в целях нахождения потоко-сцепления приходится переходить к выражению магнитной индукции и далее интегрировать для проводника сечением S магнитные потоки в пределах сечения. В терминах векторного магнитного потенциала потоко-сцепление определится относительно значения A_0 , принимаемого за начало отсчета текущих значений векторного потенциала A_i имеющих место в сечении S :

$$\Psi = \int_S \frac{A_i - A_0}{S_i} dS_i. \quad (1.29)$$

Практически определение потоко-сцепления сводится к простейшим арифметическим операциям, если проводник разделяется на конечное число элементарных площадок, для каждой из которых при расчете поля установлено значение векторного магнитного потенциала A_i .

Потоко-сцепление проводника или обмотки с числом витков w в том случае, когда поток Φ для всех точек поперечного сечения проводника обмотки является постоянным, может быть выражено как $\Psi = w\Phi$, и тогда индуктивность

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{w\Phi}{i}. \quad (1.30)$$

Введем понятие магнитной проводимости Λ :

$$\Lambda = \frac{\Phi}{F}, \quad (1.31)$$

где F — МДС проводника (обмотки).

Индуктивность теперь оказывается величиной, не зависящей от значений тока и потока, и определяется только значением магнитной проводимости

$$L = \frac{w\Phi\Lambda}{i} = \frac{wiw\Lambda}{i} = w^2\Lambda. \quad (1.32)$$

В случаях, когда имеются воздушные промежутки,

$$L = w^2\Lambda = w^2\mu_0\lambda, \quad (1.33)$$

где $\lambda = \Lambda/\mu_0$ — коэффициент магнитной проводимости для потоков, созданных МДС F .

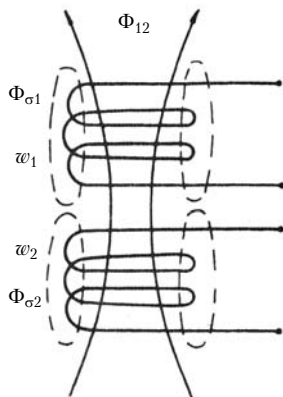


Рис. 1.36. Магнитные поля взаимной индукции и поля рассеяния

Результатирующее поле машины принято делить на магнитное поле взаимной индукции и поле рассеяния. Для представленного на рис. 1.36 варианта двух обмоток силовые линии поля взаимной индукции сцеплены с обеими обмотками Φ_{12} , а силовые линии поля рассеяния сцеплены только с одной обмоткой ($\Phi_{\sigma 1}$ — поле рассеяния первичной обмотки w_1 , $\Phi_{\sigma 2}$ — поле рассеяния вторичной обмотки w_2).

При конструировании электрических машин стремятся к тому, чтобы большая часть потока была сцеплена с обеими обмотками, расположенными на статоре и роторе, а потоки рассеяния составляли несколько процентов потока взаимной индукции. Хотя процессы электромеханического преобразования энергии определяются результирующим полем, основное значение имеет поле взаимной индукции, или главное поле машины.

При расчете поля взаимной индукции часто используется допущение о плоскопараллельности (двухмерности) поля, когда не учитывается изменение формы поля в направлении оси z , а также широко применяется принцип наложения.

Связь между индукцией B и токами, создающими поле, определяется законом полного тока. Поэтому интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен полному току, проходящему сквозь этот контур:

$$\oint H_l dl = \oint \frac{B_l}{\mu_\alpha} dl = \sum i_k, \quad (1.34)$$

где H_l , B_l — проекции векторов напряженности поля \vec{H} и индукции \vec{B} на направление обхода контура dl . Когда контур интегрирования совпадает с направлением силовых линий

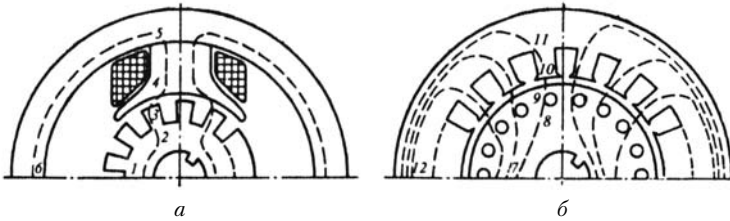


Рис. 1.37. Магнитная система явно- (а) и неявнополюсной (б) машины

поля, H_l и B_l равняются напряженности и индукции в данной точке (соответственно H и B).

Интеграл по замкнутому контуру в формуле (1.34) вычисляют по участкам, на которые разбивают контур интегрирования. Линейный интеграл какого-либо участка $\int H dl$ называется МДС этого участка.

Расчет магнитной цепи проводят при холостом ходе, когда ток в обмотке якоря близок или равен нулю.

Магнитную цепь явнополюсной (рис. 1.37, а) и неявнополюсной (рис. 1.37, б) машин разбивают на пять участков:

$$\sum F = F_{\delta} + F_z + F_m + F_a + F_c, \quad (1.35)$$

где F_{δ} — МДС воздушного зазора (участки 3—4, 9—10); F_z — МДС зубцов (участки 2—3, 8—9, 10—11); F_m — МДС полюса (участок 4—5); F_a — МДС ярма ротора (участки 1—2, 7—8); F_c — МДС ярма статора (участки 5—6, 11—12).

При расчете МДС участков явно- и неявнополюсных машин с обмоткой возбуждения на статоре или роторе имеются особенности в расчетах, которые рассматриваются в соответствующих разделах курса. МДС зазора F_{δ} рассчитывается как

$$F_{\delta} = k_{\delta} H_{\delta} \delta, \quad (1.36)$$

где H_{δ} — напряженность воздушного зазора, $H_{\delta} = B_{\delta} / \mu_0$; δ — длина воздушного зазора; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение длины силовой линии поля в воздушном зазоре за счет пазов, $H_{\delta} = 1,1 \div 1,5$.

Магнитодвижущая сила зубцов

$$F_z = H_z l_z, \quad (1.37)$$

где H_z — средняя напряженность магнитного поля в зубце; l_z — высота зубца.

Средняя напряженность вычисляется по значениям индукции в трех сечениях зубца. Если индукция в зубце не изменяется, то H_z определяется для всей длины зубца.

Магнитодвижущая сила полюса рассчитывается по формуле

$$F_m = H_m l_m, \quad (1.38)$$

здесь H_m — напряженность в полюсе; l_m — длина полюса.

Магнитодвижущая сила ярма ротора

$$F_a = H_a l_a, \quad (1.39)$$

где H_a — напряженность в ярме ротора; l_a — длина силовой линии в ярме ротора машины.

Магнитодвижущая сила ярма статора

$$F_c = H_c l_c, \quad (1.40)$$

где H_c — напряженность в ярме статора; l_c — длина силовой линии в ярме статора.

В неявнополюсных сердечниках МДС ярм статора и ротора рассчитывается с учетом коэффициента влияния на МДС неравномерности распределения индукции в ярмах статора и ротора машины

$$F_a = \xi H_a l_a. \quad (1.41)$$

При расчете магнитной цепи машины задаются индукцией в воздушном зазоре B_δ , а затем, определив поток, рассчитывают индукцию на остальных участках при известной геометрии машины. Вычислив значения индукции в отдельных участках, по таблицам для соответствующего сорта стали определяют напряженность поля для каждого участка.

Просуммировав МДС участков, находят полный ток (1.35):

$$\Sigma F = I w = F_B, \quad (1.42)$$

где F_B — МДС обмотки возбуждения.

Расчет МДС проводят для нескольких значений B_δ , а затем строят характеристику намагничивания машины или магнитную характеристику машины $\Phi_\delta = f(F_B)$ (рис. 1.38). Начальная часть характеристики соответствует ненасыщенному состоянию и определяется зависимостью $\Phi_\delta = f(F_\delta)$, так как МДС участков магнитопроводов малы. Рабочая точка, соответствующая номинальному значению потока в за-

зоре $F_{\delta\text{ном}}$, выбирается на колене магнитной характеристики.

Обычно ΣF рассчитывают на пару полюсов. При этом в контур, где замыкается поток, входят два воздушных зазора, две длины зубцов, полюсов и полные длины силовых линий в ярмах статора и ротора (см. рис. 1.37). После расчета магнитной системы можно определить МДС сосредоточенной обмотки возбуждения на один полюс

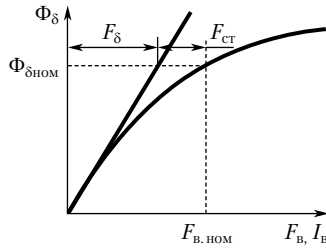


Рис. 1.38. Магнитная характеристика машины

$$I_{\text{в}} w_{\text{в}} = \frac{F_{\text{в}}}{2}, \quad (1.43)$$

где $I_{\text{в}}$ — ток возбуждения; $w_{\text{в}}$ — число витков обмотки возбуждения.

В многополюсных машинах картина поля повторяется под каждой парой полюсов, поэтому расчет магнитной системы проводят на пару полюсов.

Магнитодвижущую силу машины можно представить в следующем виде:

$$\Sigma F = F_{\delta} + F_{\text{ст}}, \quad (1.44)$$

где $F_{\text{ст}}$ — МДС стальных участков. Отношение

$$k_{\text{н}} = \frac{F_{\delta} + F_{\text{ст}}}{F_{\delta}} \quad (1.45)$$

определяет коэффициент насыщения машины, который зависит от воздушного зазора и насыщения стальных участков магнитной цепи ($k_{\text{н}} \approx 1,1 \div 1,6$). В синхронных машинах и машинах постоянного тока $k_{\text{н}} = 1,1 \div 1,3$, а в асинхронных $k_{\text{н}} = 1,2 \div 1,6$. Выбор индукций в зазоре и зубцах определяет энергетические и массогабаритные характеристики машины.

Даже в насыщенных электрических машинах энергия магнитного поля, определяемая произведением $BH/2$, в основном сосредоточена в воздушном зазоре. Если принять магнитную проницаемость стали $\mu_{\text{ст}} = \infty$, то при этом $F_{\text{ст}}$ равна нулю и индукция в зазоре пропорциональна Iw :

$$B_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta'} Iw = kIw, \quad (1.46)$$

где $\delta' = k_{\text{н}} \delta$.

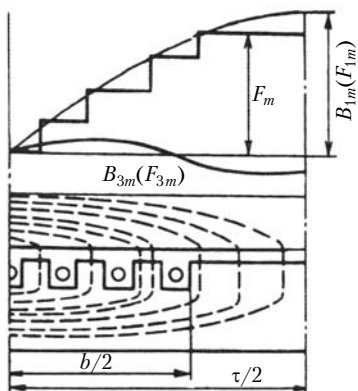


Рис. 1.39. Магнитное поле неявнополюсной машины

ной машины можно получить при синусоидальном распределении МДС, что теоретически обеспечивается синусными обмотками, в которых витки распределяются по закону синуса.

В явнополюсных ненасыщенных машинах с обмотками возбуждения в виде сосредоточенных катушек форма поля в зазоре определяется магнитным сопротивлением воздушного зазора. Чтобы приблизить форму поля в зазоре к синусоиду, надо профилировать зазор следующим образом (рис. 1.40):

$$\delta_x \approx \frac{\delta}{\cos \frac{\pi}{\tau} x}, \quad (1.47)$$

где δ — зазор под серединой полюса.

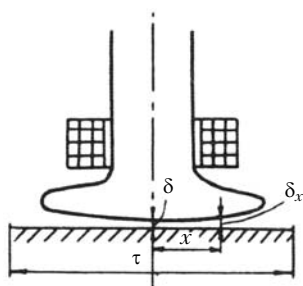


Рис. 1.40. Профиль воздушного зазора явнополюсной машины

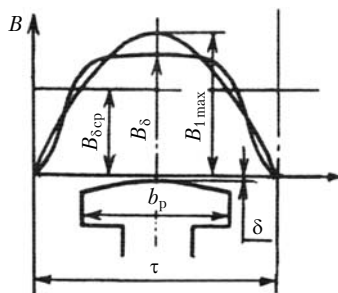


Рис. 1.41. Магнитное поле явнополюсной машины

В ненасыщенной машине форма поля в зазоре при холостом ходе определяется распределением МДС обмотки, в которой протекает ток намагничивания, и магнитным сопротивлением воздушного зазора (рис. 1.39). Это имеет место в неявнополюсной машине с равномерным зазором и гладкими статором и ротором, когда пазы на статоре и роторе отсутствуют.

Синусоидальное распределение индукции в зазоре ненасыщенной неявнополюс-

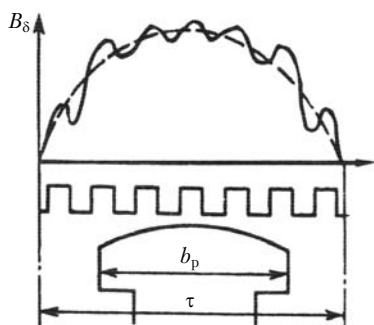


Рис. 1.42. Поле машины при наличии пазов на статоре

ном зазоре. При расчетах электрических машин $B_{\delta\text{ср}}$ входит в формулы для определения ЭДС.

Зубцы на статоре изменяют магнитное сопротивление воздушного зазора и вносят искажения в форму поля в воздушном зазоре (рис. 1.42). Наличие пазов на роторе и статоре еще более усложняет картину поля. Однако амплитуда 1-й гармоники при этом изменяется мало.

При нагрузке поле взаимной индукции определяется токами, протекающими в обмотках статора и ротора. При этом происходит искажение формы поля в воздушном зазоре и поток в зазоре Φ_δ уменьшается по сравнению с потоком при холостом ходе. Влияние тока нагрузки на характеристики машины называют реакцией якоря, которая в различных типах машин проявляется по-разному и изучается в соответствующих разделах курса.

Поле рассеяния машины делят на три части: на поле пазового рассеяния, поле рассеяния лобовых частей и поле дифференциального рассеяния.

Поле пазового рассеяния делится на поле рассеяния в пазу и поле рассеяния по головкам зубцов (рис. 1.43). Поток пазового рассеяния зависит от геометрии паза ($b_{\text{п}}$ — высоты и $h_{\text{п}}$ — ширины паза), а также от размера раскрытия (шлица) паза $b_{\text{ш}}$ и

При этом зазор под краем полюсного наконечника получается равным $(1,5 \div 1,6)\delta$.

Хотя в явнополюсной машине, имеющей неравномерный воздушный зазор, выполненный по формуле (1.47), поле в зазоре имеет трапециевидальную форму, высшие гармоники имеют небольшие амплитуды. На рис. 1.41 $B_{1\text{max}}$ — амплитуда 1-й гармоники, $B_{\delta\text{ср}}$ — среднее значение индукции в воздушном зазоре.

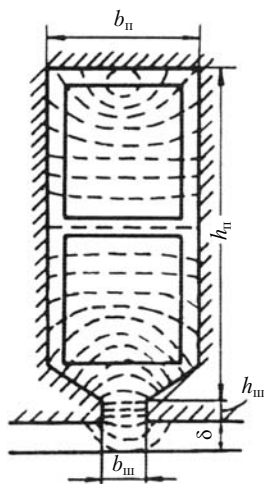


Рис. 1.43. Поле пазового рассеяния

высоты усика паза $h_{\text{ш}}$. Расчет поля пазового рассеяния осложняется наличием токов в пазу и сложной формой пазов, поэтому аналитические решения возможны лишь для простейших случаев и при проектировании используются приближенные соотношения, полученные из опыта изготовления и эксплуатации электрических машин.

Рассеяние лобовых частей обмоток зависит от выполнения лобовых частей, числа полюсов и вида обмотки. Обычно лобовое рассеяние меньше пазового.

В воздушном зазоре электрической машины наряду с основной гармоникой поля существуют поля высших гармоник. При расчете электрических машин рабочим потоком считают поток 1-й гармоники, а потоки высших гармоник поля относят к потокам рассеяния воздушного зазора или дифференциальному рассеянию.

1.9. Вращающееся магнитное поле

Для упрощения магнитное поле электрических машин может рассматриваться как стационарное и в первом приближении — как плоскопараллельное. Электромеханическое преобразование энергии почти во всех электрических машинах связано с вращающимся магнитным полем. При этом

в понятие стационарного магнитного поля вкладывается тот смысл, что в любой момент времени амплитуда и форма магнитного поля остаются неизменными.

Вращающееся магнитное поле при неподвижных обмотках в трехфазной системе может быть создано, если разместить в пазах обмотки так, как это показано на рис. 1.44. Мгновенные значения токов в фазах для времени, соответствующего положению векторной диаграммы на рис. 1.45, равны

$i_a = I_{\text{max}}$ и $i_b = i_c = -\frac{1}{2}I_{\text{max}}$. Токи в левой и правой половинах

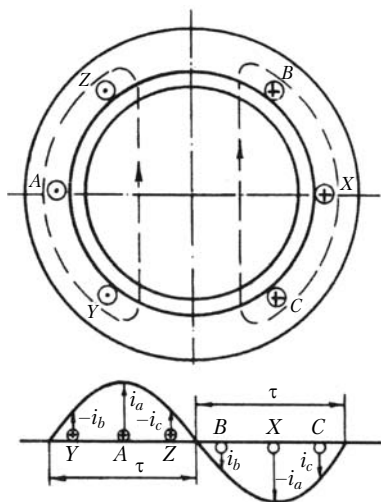


Рис. 1.44. Вращающееся магнитное поле в трехфазной машине

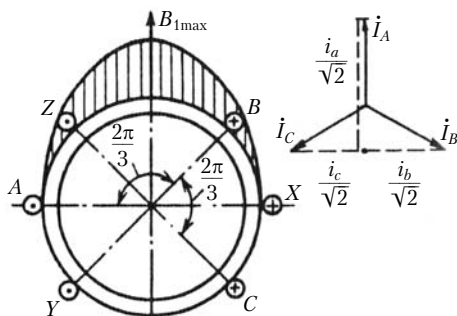


Рис. 1.45. Схема и векторная диаграмма трехфазной симметричной обмотки

машины совпадают по модулю, и в воздушном зазоре создается поле, индукция B_{\max} которого перпендикулярна плоскости фазы обмотки, где в данный момент ток имеет максимум и смещен относительно максимума поверхностной плотности тока на 90° (см. рис. 1.45). При изменении токов во времени происходит вращение поля в воздушном зазоре. Таким образом, благодаря определенному расположению обмоток в пространстве и сдвигу токов во времени в электрических машинах образуется вращающееся магнитное поле.

Вращающееся поле создается в генераторах, в которых при вращении обмотки возбуждения в трехфазных обмотках статора наводятся напряжения и токи, сдвинутые во времени на электрический угол 120° . Вращающееся магнитное поле может быть получено также при вращении обмотки, в которой протекает постоянный ток, или при вращении постоянного магнита.

Вращающееся магнитное поле может перемещаться в воздушном зазоре с неравномерной скоростью, а форма поля может отличаться от синусоиды. При этом максимальное значение индукции будет различным по окружности внутреннего диаметра статора. Несинусоидальное поле в воздушном зазоре можно представить состоящим из основной и высших гармоник поля. В несимметричной машине поле основной и высших гармоник имеет прямую и обратную составляющие. Таким образом, в общем случае в воздушном зазоре имеются спектры гармоник, вращающихся в противоположные стороны с различными частотами. В частном случае, когда высшие гармоники отсутствуют, при равномерной частоте вращения поля и неизменной

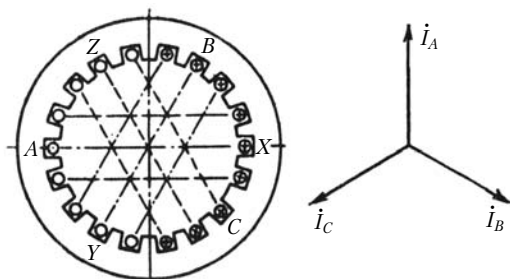


Рис. 1.46. Схема и векторная диаграмма трехфазной обмотки ($p = 1, q = 3$)

амплитуде вращающееся поле называют круговым или синусоидальным. В книге рассматривается в основном теория электромеханического преобразования энергии при круговом поле в воздушном зазоре.

Чтобы в зазоре укладывалось целое число волн магнитного поля и не возникало отраженных волн, необходимо выбрать определенное число пазов:

$$z = 2mpq, \quad (1.48)$$

где q — число пазов на полюс и фазу.

Для обмотки, показанной на рис. 1.46, число пазов равно 18, так как $m = 3, p = 1, q = 3$.

Сходственные проводники каждого витка фазы расположены друг от друга на расстоянии полюсного деления

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}, \quad (1.49)$$

где D_a — внутренний диаметр статора.

Для рассматриваемой обмотки полюсное деление составляет половину окружности. Поэтому шаг обмотки y равен полюсному делению τ . Обмотки с $y = \tau$ называются обмотками с диаметральной шаг. Двойному полюсному делению в двухполюсной машине 2τ соответствует электрический угол 360° . Начала фаз A, B, C сдвинуты относительно друг друга на электрический угол 120° , что в двухполюсной машине составляет $1/3$ окружности. Исходя из методических соображений в книге начала обмоток обозначаются буквами A, B, C или a, b, c , а концы X, Y, Z или x, y, z . По ГОСТ 183—74 начала фаз обмоток статора обозначаются C_1, C_2, C_3 , а концы C_4, C_5, C_6 ; начала фаз обмоток ротора — P_1, P_2, P_3 , а концы P_4, P_5, P_6 .

Из рис. 1.44 очевидно, что распределение токов по окружности статора приближается к синусоидальному закону. Если считать магнитное сопротивление стали статора и ротора равным нулю, то энергия магнитного поля сосредоточена в основном в воздушном зазоре. При этом закон изменения индукции в воздушном зазоре — синусоидальный.

При изменении фазы токов, что соответствует повороту векторной диаграммы токов, кривые распределения токов по окружности статора и магнитного потока в воздушном зазоре будут вращаться в направлении следования фаз. Таким образом, в зазоре электрической машины создается вращающееся магнитное поле.

В двухполюсной машине частота вращения магнитного поля равна частоте напряжения и тока статора f_1 .

При увеличении числа полюсов полюсное деление составляет часть окружности: для $2p = 4$ оно равно $1/4$, для $2p = 6$ оно равно $1/6$ и т.д.

На рис. 1.47 приведена схема четырехполюсной трехфазной обмотки с $q = 1$. В этом случае, так же как и в двухполюсной машине, образуется вращающееся поле, но за один период поле поворачивается на половину окружности и частота вращения поля равна

$$n_1 = \frac{f_1}{2}. \quad (1.50)$$

Для магнитного поля с p парами полюсов

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad (1.51)$$

или в оборотах в минуту

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (1.52)$$

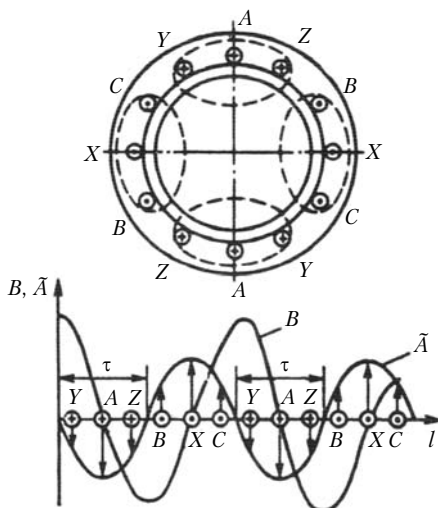


Рис. 1.47. Схема четырехполюсной трехфазной обмотки

При этом линейная окружная скорость поля

$$v_1 = \pi D_a n_1 = 2p\tau \frac{f_1}{p} = 2\tau f_1. \quad (1.53)$$

При частоте 50 Гц получаются стандартные частоты вращения поля, указанные в табл. 1.2. Магнитное поле вращается в направлении, определяемом токами фаз *A*, *B*, *C* обмотки, к которой подводятся напряжения, соответствующие векторной диаграмме трехфазной системы *A*, *B*, *C*. Для изменения направления вращения поля достаточно изменить порядок следования фаз — подключение выводов обмотки к сети.

Таблица 1.2

<i>p</i>	1	2	3	4	5	6	8	10	30	50
<i>n</i> ₁ , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	375	300	100	60

Распределение магнитного поля в воздушном зазоре имеет периодический характер. Кривая индукции в зазоре многополюсной машины повторяется через каждые два полюса.

Вращающееся магнитное поле может быть создано не только трехфазной, но и двухфазной, и многофазными обмотками.

На рис. 1.48 представлена схема двухфазной обмотки, обеспечивающая в зазоре вращающееся поле при сдвиге токов в фазах *A* и *B* и сдвиге обмоток в пространстве на электрический угол, равный 90°. В двухфазной обмотке на рис. 1.48 $z = 2mpq = 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 = 12$. Как и в трехфазной системе, при изменении токов поле в воздушном зазоре будет вращаться, следуя за максимумом тока.

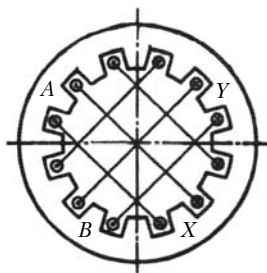


Рис. 1.48. Двухфазная симметричная обмотка ($m = 2$, $p = 1$, $q = 3$, $z = 12$)

Вместо двухфазной обмотки в тех же пазах на рис. 1.48 можно выполнить трехфазную обмотку. Согласно уравнению (1.48) $q = 2$. Объем меди при этом в трехфазной и двухфазной обмотках не изменяется, а при одной и той же плотности тока МДС обмоток будет одной и той же. Двухфазная и трехфазная машины, выполненные в тех же габаритах, будут развивать тот же электромагнитный момент.

Нетрудно убедиться, что в общем случае в том же объеме зубцовой зоны можно выполнить и многофазные обмотки. Поэтому в общем виде формула для определения электромагнитного момента (1.100) имеет коэффициент $m/2$. В этом, по существу, и заключается приведение симметричных многофазных машин к двухфазным.

Вращающееся поле нельзя создать одной неподвижной обмоткой. Если однофазную обмотку питать переменным напряжением, в воздушном зазоре будет пульсирующее поле, которое состоит из двух вращающихся в противоположные стороны магнитных полей: прямого и обратного.

Амплитуды прямого и обратного полей одинаковые. Частоты вращения прямого и обратного полей одни и те же. Таким образом, в однофазных машинах электрохимическое преобразование энергии происходит при наличии в зазоре двух вращающихся полей.

Однофазная обмотка может быть получена из двух- или трехфазной обмотки, если соединить по определенным правилам фазы обмоток, а также при использовании одной фазы в двухфазной машине или одной или двух фаз в трехфазной.

В воздушном зазоре электрической машины могут быть два поля, вращающихся в противоположные стороны с одинаковой синхронной частотой вращения, но имеющих различные амплитуды. Такое поле называется *эллиптическим*. Эллиптическое поле появляется в симметричной электрической машине при питании фаз машины несимметричными напряжениями. Эллиптическое поле в воздушном зазоре появляется также из-за несимметрии машины.

До сих пор рассматривалось поле машины, которое создавалось одной обмоткой (обмоткой статора или ротора). При нагрузке результирующее поле создается токами, протекающими в обмотках статора и ротора электрической машины. Токи ротора создают поле ротора, неподвижное относительно поля статора. Таким образом, в воздушном зазоре машины при нагрузке имеет место результирующее вращающееся магнитное поле, созданное токами статора и ротора. Как и при холостом ходе, вращающееся поле можно представить в виде вектора индукции B или (условно) потока Φ , вращающегося в зазоре машины с синхронной частотой.

1.10. Обмотки электрических машин

Обмотки — это контуры, в которых протекают токи, создающие магнитное поле машины.

Конструктивные исполнения обмоток весьма разнообразны — от массивных ферромагнитных и немагнитных цилиндров до сложных многофазных обмоток крупных электрических машин переменного и постоянного тока. Обмотки электрической машины — одна из главных частей машины, и от того, как они спроектированы, во многом зависят основные энергетические и массогабаритные характеристики.

Обмотки электрических машин выполняются *однофазными, двухфазными, трехфазными* и *многофазными*.

В электрических машинах, как правило, применяются симметричные обмотки. Для трехфазных симметричных обмоток необходимо выполнить следующие условия. Все три фазы обмотки должны находиться в одинаковых условиях. Во всех трех фазах должны наводиться одинаковые ЭДС. Электродвижущие силы фаз должны быть сдвинуты на 120° .

При выполнении обмоток необходимо обеспечить механическую и электрическую прочность, достаточную нагревостойкость, технологичность изготовления и удобство ремонта. Обмотки должны иметь минимальную массу и надежно работать при наилучших энергетических показателях машины.

По характеру потокоцеплений витков обмотки можно разделить на *сосредоточенные* и *распределенные*.

В сосредоточенных обмотках практически все витки имеют одинаковые потокоцепления с полем взаимной индукции. К сосредоточенным относятся обмотки трансформаторов, обмотки возбуждения явнополюсных синхронных машин и машин постоянного тока (см. рис. 1.37, а).

В распределенных обмотках в каждый момент времени из-за различного расположения витков в магнитном поле потокоцепления витков обмотки различны (см. рис. 1.39). К распределенным относятся обмотки якорей машин переменного и постоянного тока, обмотки роторов асинхронных машин, компенсационные и специальные обмотки.

Сосредоточенные, или катушечные, обмотки выполняются из круглого или прямоугольного провода при намотке витков плашмя или на ребро. Разновидности сосредоточенных обмоток возбуждения и трансформаторов рассматриваются в соответствующих разделах курса.

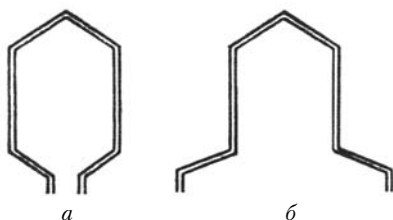


Рис. 1.49. Сечения двухслойной обмотки:

а — петлевая; *б* — волновая

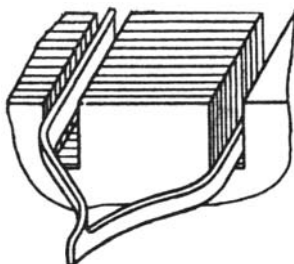


Рис. 1.50. Лобовые части двухслойной обмотки

При выполнении обмоток необходимо представлять, как элементы обмотки располагаются в магнитном поле машины и как секции обмотки соединены между собой. Схема обмоток изображается на плоскости и представляет собой разрезанную вдоль оси машины цилиндрическую поверхность реальной машины, на которой в пазах выполняется реальная обмотка. Геометрические размеры схемы — развертки обмотки — не имеют значения, а важно относительное расположение сторон секций относительно друг друга и полюсов машины.

Распределенные обмотки можно разделить на *простые* и *сложные*. Сложные обмотки состоят из двух или трех простых обмоток.

Простые обмотки делятся на *однослойные* и *двухслойные*. Обмотка делится на секции. Секции, в свою очередь, состоят из витков. На рис. 1.49 секции выполнены из одного витка. Секции обмотки имеют две стороны. В двухслойных обмотках одна сторона секции лежит в нижней части паза, а другая — в верхней. Чтобы одна часть секции лежала в нижней части паза, а другая — в верхней, лобовые части обмотки специально профилируются (рис. 1.50). Лобовые части обмоток отгибаются в радиальном направлении.

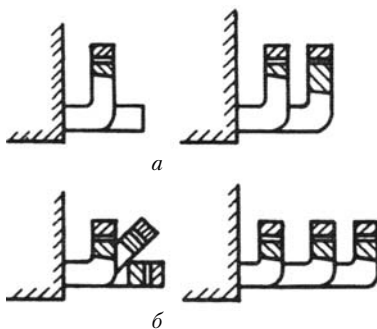


Рис. 1.51. Лобовые части однослойной обмотки:

а — двухплоскостной;
б — трехплоскостной обмотки

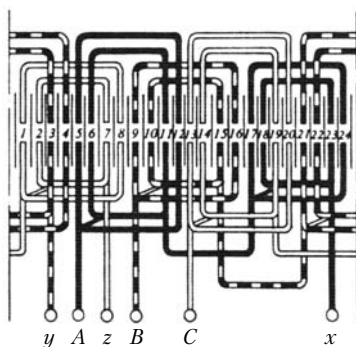


Рис. 1.52. Трехфазная однослойная двухплоскостная обмотка
($m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $z = 24$)

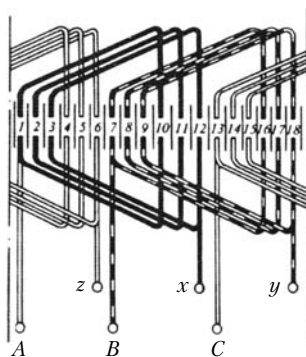


Рис. 1.53. Трехфазная шаблонная обмотка
($m = 3$, $2p = 2$, $q = 3$, $z = 18$)

Однослойные обмотки по размещению лобовых частей делятся на *концентрические*, в которых лобовые части секций охватывают друг друга, и *двух- и трехплоскостные*, в которых лобовые части располагаются в двух или трех плоскостях (рис. 1.51, а, б).

На рис. 1.52 представлена схема-развертка трехфазной однослойной двухплоскостной обмотки для $2p = 4$, $q = 2$, $z = 24$. Двух- и трехплоскостные однослойные обмотки нетехнологичны, так как имеют различные по форме секции.

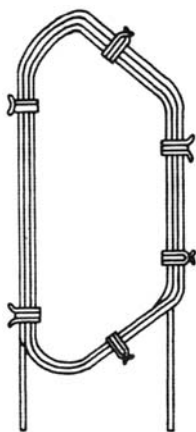


Рис. 1.54. Катушка шаблонной обмотки перед укладкой в пазы

Шаблонные или равносекционные обмотки применяются в статорных обмотках машин мощностью до 10 кВт. Эти обмотки имеют мягкие одинаковые секции. Простая трехфазная шаблонная обмотка для $2p = 2$, $q = 3$, $z = 18$ показана на рис. 1.53. Секция шаблонной обмотки представлена на рис. 1.54. Обычно такие секции состоят из нескольких витков или десятков витков.

Существуют разновидности шаблонной обмотки — *цепные* обмотки, позволяющие получить более компактные лобовые части. Перед укладкой обмотки в пазы секции наматываются на шаблоны. После укладки и формовки

лобовых частей обмотки пропитываются лаками и запекаются.

Принцип образования двухслойных обмоток проще представить, если начать рассмотрение с кольцевой граммавской обмотки машины постоянного тока (рис. 1.55) и трехфазной обмотки обращенной синхронной машины (рис. 1.56). Кольцевая обмотка представляет собой намотанную на тороид замкнутую обмотку. Если поставить между полюсами щетки так, чтобы они скользили по неизолированным частям обмотки или по специально выполненной для осуществления контакта части машины — коллектору, то со щеток можно снять постоянный ток (см. рис. 1.55).

Чтобы получить трехфазное переменное напряжение, надо с кольцевой обмотки вывести на кольца напряжения от трех точек, отстоящих друг от друга на электрический угол, равный 120° (см. рис. 1.56).

На рис. 1.56 показана кольцевая обмотка, состоящая из 12 витков, или 12 секций. Секция состоит из одного витка, но может иметь и несколько витков.

Двенадцатисекционная кольцевая обмотка дает возможность получить двенадцатифазную систему напряжений, если каждую секцию вывести на кольца. Таким образом, число фаз зависит от выполнения обмотки и числа отпаяк от нее. Понятие фазы напряжения или числа фаз обмотки связано с электрическим углом между векторами фазных напряжений или пространственным углом между фазами обмотки в двухполюсной машине. С одной и той же обмотки можно получить многофазное или трехфазное напряжение, а при наличии коллектора и щеток — постоянное напряжение.

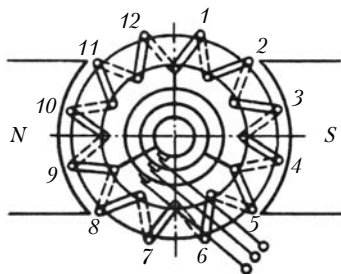
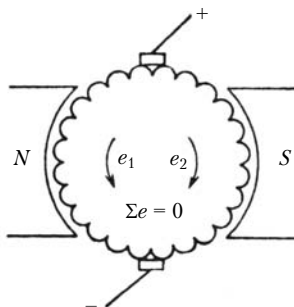


Рис. 1.55. Схема кольцевой граммавской обмотки

Рис. 1.56. Получение многофазного переменного напряжения

На кольцевой обмотке хорошо видно наличие двух параллельных ветвей обмотки якоря (см. рис. 1.55). В симметричных обмотках при равенстве ЭДС в параллельных ветвях $\sum e = e_1 + e_2 = 0$.

В кольцевой обмотке ЭДС наводится только в частях обмотки, лежащих на внешней поверхности тороида, т.е. в частях, пересекающих силовые линии магнитного поля. Чтобы улучшить использование материала обмотки, надо увеличить активную длину витка (часть, в которой наводится ЭДС). Для этого необходимо часть витков граммовской обмотки, расположенных на внутренней части тороида, вынести на внешнюю часть.

Принцип образования так называемых *барабанных* обмоток, в которых обе части витков расположены на внешней части якоря, показан на рис. 1.57. Чтобы не загромождать рисунок и не затруднять анализ схемы обмотки, на рис. 1.57, б дано расположение лишь части секций обмотки.

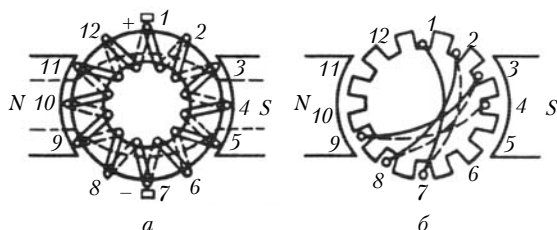


Рис. 1.57. Кольцевые (а) и барабанные (б) обмотки

Барабанные обмотки — двухслойные, причем одна сторона секции в таких обмотках лежит на дне паза, а другая — в верхней части. Чередование секций в пазах барабанной обмотки хорошо видно на принципиальной схеме обмотки (рис. 1.58). На этой схеме показано расположение секций в верхней (сплошная линия) и нижней (штриховая линия) частях паза.

В граммовской обмотке щетки устанавливаются между полюсами, а в барабанных обмотках — под серединой полюса, так как секции обмотки имеют отгиб лобовой части

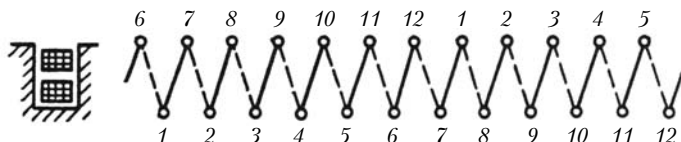


Рис. 1.58. Принципиальная схема двухслойной обмотки по рис. 1.57, б

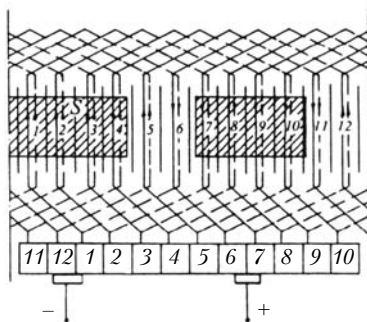
в тангенциальном направлении (см. рис. 1.49). Несмотря на различное расположение щеток при вращении коммутация, т.е. переход секции из одной параллельной ветви в другую, в обоих типах обмоток происходит в зоне, расположенной между полюсами.

Барабанные и кольцевые обмотки принципиально не отличаются друг от друга. Отличия лишь технологические. Поэтому изучение обмоток полезно вести, обращаясь к тем и другим обмоткам.

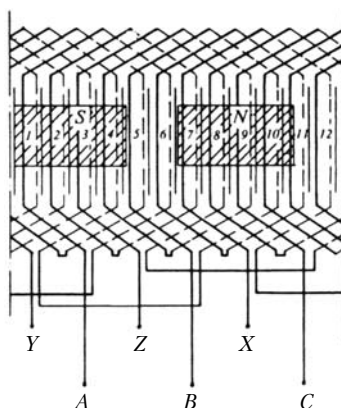
Как следует из рис. 1.55 и 1.56, обмотки переменного и постоянного тока в сущности не отличаются друг от друга. С одной и той же кольцевой обмотки при наличии коллектора снимается постоянный ток, а кольца и щетки дают возможность получить переменный ток.

На рис. 1.59 дана схема двухполюсной обмотки постоянного тока с числом пазов $z = 12$ и числом коллекторных пластин $K = 12$. Число секций петлевой обмотки 24. На рис. 1.60 представлена схема трехфазной двухслойной обмотки, выполненной для тех же чисел пар полюсов и зубцов, что и обмотка постоянного тока.

Двухслойные обмотки применяются чаще однослойных и дают возможность выбора более благоприятного шага, они более дешевые вследствие уменьшения расхода меди и изоляции и лучше допускают механизацию изготовления. В машинах постоянного тока с коллектором однослойные обмотки не применяются.



**Рис. 1.59. Обмотка
постоянного тока
($2p = 2$, $z = 12$, $K = 12$)**



**Рис. 1.60. Трехфазная
петлевая обмотка
($2p = 2$, $q = 2$, $z = 12$)**

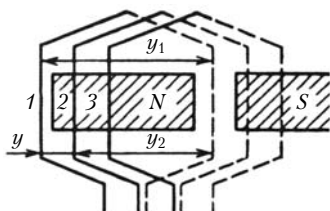


Рис. 1.61. Секции петлевой обмотки

Двухслойные обмотки делятся на *петлевые* и *волновые*. Обмотки электрических машин характеризуются шагом обмотки. Различают результирующий шаг обмотки y — расстояние между двумя последовательно соединенными секциями — и частичные шаги y_1 и y_2 , которые определяют соответственно расстояние между началом и концом первой и началом соседней секции. Обычно шаги обмотки измеряются по отношению к полюсному делению или числом эффективных (элементарных) пазов.

На рис. 1.61 показан элемент схемы петлевой обмотки. Здесь y_1 — первый частичный шаг — расстояние между началом и концом секции, y_2 — второй частичный шаг — расстояние между концом первой и началом второй секции. На схемах обмоток половина секции, лежащая в верхней части паза, изображается сплошной линией, а часть секции, лежащая в нижнем слое обмотки, — штриховой линией.

В петлевых обмотках результирующий шаг y равен разности частичных шагов:

$$y = y_1 - y_2. \quad (1.54)$$

В простых петлевых обмотках $y = 1$.

В волновых обмотках (рис. 1.62) результирующий шаг равен сумме частичных шагов:

$$y = y_1 + y_2. \quad (1.55)$$

Если в двухслойных обмотках шаг секции равен полюсному делению, то такие обмотки называются обмотками с диаметральной шагом.

Для экономии меди и улучшения формы поля в воздушном зазоре двухслойные обмотки выполняют с укороченным шагом, $y < \tau$. При $y \approx 0,8$ достигается экономия меди,

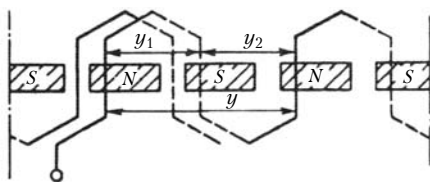


Рис. 1.62. Секции волновой обмотки

а уменьшение основной гармоники ЭДС по сравнению с ЭДС обмотки с диаметральной шагом составляет всего несколько процентов.

На рис. 1.60 представлена схема трехфазной

двухслойной петлевой обмотки с диаметральной шагом для $m = 3$, $2p = 2$, $q = 2$, $y = 1$, $y_1 = \tau$, $z = 2mpq = 2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 = 12$.

Трехфазная петлевая обмотка с укороченным шагом $y = 5/6\tau$, для тех же чисел полюсов ($2p = 2$) и числа пазов на полюс и фазу ($q = 2$) показана на рис. 1.63. По распределению фазных зон обмотки с укороченным шагом видно, что фазные зоны нижнего слоя смещаются относительно зон верхнего слоя на $\tau - y_1$.

При протекании трехфазных переменных токов по секциям обмотки мгновенные значения токов в трехфазных зонах обмоток с диаметральной и укороченным шагом совпадают и образуются вращающееся поле.

В рассмотренных схемах петлевых обмоток число параллельных ветвей $a = p$. При $p = 1$ $a = 1$. При $2p = 4$ петлевые обмотки дают возможность получить две параллельные ветви, в шестиполюсных машинах число параллельных ветвей три и т.д. Из условий коммутации и технологии изготовления ток в параллельной ветви обмотки не выбирается больше 400 А. Поэтому в крупных машинах необходимо иметь число параллельных ветвей больше единицы.

На рис. 1.64 показана трехфазная петлевая обмотка для $m = 3$, $2p = 4$, $2a = 4$, $q = 2$, $y \approx 0,8\tau = 5$, $z = 2mpq = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 24$.

A	Z	B	X	C	Y
A	Z	B	X	C	Y

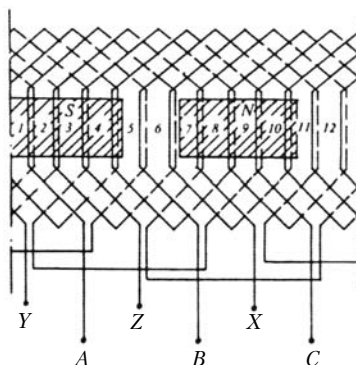


Рис. 1.63. Трехфазная петлевая обмотка ($2p = 2$, $2a = 2$, $q = 2$, $y \approx 0,8\tau = 5$, $z = 12$)

A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	X	C	Y
A	Z	B	X	C	Y	A	Z	B	X	C	Y

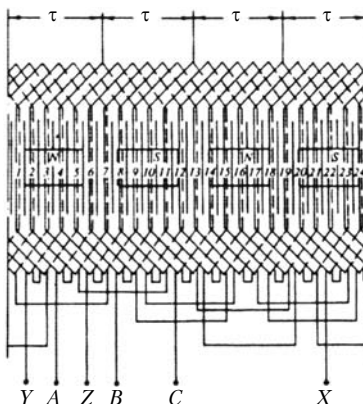


Рис. 1.64. Трехфазная петлевая обмотка ($2p = 4$, $2a = 4$, $q = 2$, $y \approx 0,8\tau = 5$, $z = 24$)

В многополюсных машинах переменного тока петлевые обмотки имеют большее число соединений, что увеличивает расход меди и усложняет технологию изготовления обмоток. Если число параллельных ветвей можно выбрать равным одной или двум, целесообразно выбрать волновую обмотку. Преимущество волновых обмоток перед петлевыми состоит в том, что сами лобовые части волновой обмотки являются межкатушечными соединениями (см. рис. 1.63).

На рис. 1.65 дана схема двухслойной волновой обмотки для $2p = 4$, $q = 2$, $z = 2mq = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 2 = 24$. В машинах переменного тока волновая обмотка с целым q для большинства секций выполняется с результирующим шагом, равным двойному полюсному делению, и только в последней секции делается искусственно укороченный переход, так, чтобы ее можно было соединить с секцией, лежащей рядом с исходной. Обычно для упрощения технологии изготовления обмоток применяют секции с одинаковым шагом, а укорочение достигается за счет перемены — перехода в лобовых частях обмотки (см. рис. 1.65).

Выполнение обмоток якорей машин постоянного тока принципиально не отличается от двухслойных обмоток переменного тока. Однако наличие механического преобразователя частоты — коллектора — вносит некоторые особенности в технологию изготовления обмоток.

Для улучшения коммутации стремятся уменьшить число витков в секции. Для этого увеличивают число коллекторных пластин. Чтобы не делать мелкие пазы, в один паз укладывают в два слоя не одну, а две или три секции. При

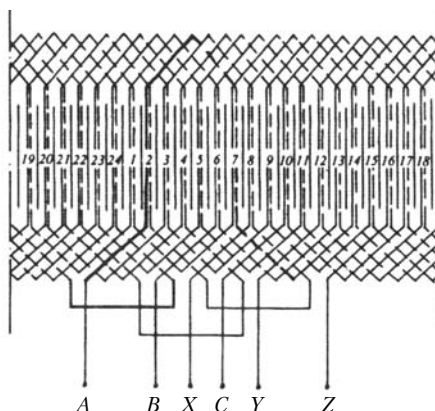


Рис. 1.65. Схема волновой обмотки ($m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $z = 24$)

составлении схем обмоток пользуются понятием числа эффективных пазов $z_{\text{э}}$. При этом $z_{\text{э}} = S = K$, где S — число секций обмоток; K — число коллекторных пластин. Для упрощения технологии намотки катушки ее выполняют секционной (из одной, двух или трех секций).

Обмотки машин постоянного тока также делятся на *петлевые* и *волновые*, на *простые* и *сложные*. Сложные обмотки состоят из двух или трех простых петлевых или волновых обмоток.

В простых петлевых обмотках машин постоянного тока $2a = 2p$. В волновых обмотках, независимо от числа полюсов, $2a = 2$.

Схема простой петлевой обмотки для $2p = 2$, $y = 1$, $y_1 = 6$ показана на рис. 1.59. В петлевых обмотках число параллельных ветвей $2a = 2p$. Секции обмотки выведены на коллектор. Число коллекторных пластин равно числу секций и числу эффективных пазов.

Наличие параллельных ветвей в многополюсных машинах хорошо видно из схемы граммовской обмотки (рис. 1.66). Здесь четыре полюса, четыре щетки и четыре параллельные ветви в обмотке якоря.

Внутри замкнутой симметричной обмотки якоря в симметричной машине уравнильные токи отсутствуют, так как ЭДС в параллельных ветвях равны и направлены встречно. Из-за несимметрии воздушного зазора $e_1 \neq e_2$ (см. рис. 1.55) и $\sum e \neq 0$. Если $\sum e \neq 0$, то ЭДС параллельных ветвей будут различными и возникнут уравнильные токи. Уравнильные токи замыкаются внутри обмотки якоря через одноименные щетки и ухудшают коммутацию. Чтобы разгрузить щетки от уравнильных токов, выполняют уравнильные соединения Y (см. рис. 1.66), которые соединяют теоретически равнопотенциальные точки обмотки. Волновые обмотки не требуют уравнильных соединений, так как их лобовые части соединяют равнопотенциальные точки.

Обмотки машин переменного и постоянного тока более подробно рассматриваются также в соответствующих главах книги.

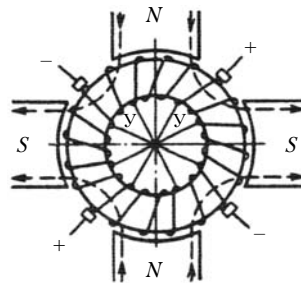


Рис. 1.66. Кольцевая четырехполюсная обмотка:

Y — уравнильные соединения

1.11. Наведение ЭДС в обмотках электрических машин

Электродвижущая сила в витке может наводиться при вращении витка в магнитном поле или при перемещении магнитного поля относительно витка (рис. 1.67, а). Электродвижущая сила в витке наводится также, если неподвиж-

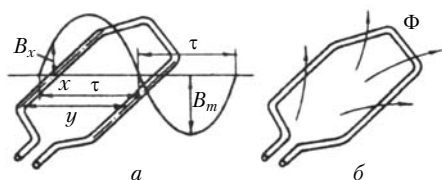


Рис. 1.67. Наведение ЭДС в витке

ный виток пронизывается изменяющимся во времени магнитным потоком (рис. 1.67, б). В общем случае ЭДС в витке наводится при пространственном перемещении поля и витка относи-

тельно друг друга, а также при изменении потока, сцепленного с витком, во времени. Электродвижущая сила, обусловленная относительным перемещением витка и поля, называется ЭДС вращения. Электродвижущую силу, зависящую от изменения потока во времени, называют трансформаторной ЭДС.

Электродвижущую силу вращения можно определить по формуле, предложенной Фарадеем (см. рис. 1.67, а):

$$e_x = B_x l_\delta v, \quad (1.56)$$

где l_δ — активная длина витка; v — линейная скорость.

Электродвижущая сила секции (катушки), состоящей из нескольких витков,

$$e_k = -w_k \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi_k}{dt}, \quad (1.57)$$

где потокосцепление

$$\Psi_k = w_k \Phi = \Psi_{km} \cos(\omega t - \alpha_k). \quad (1.58)$$

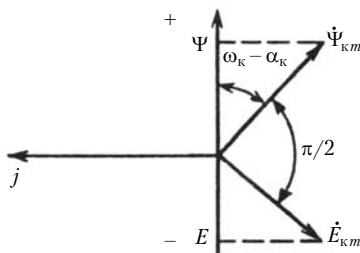


Рис. 1.68. ЭДС и потокосцепление на комплексной плоскости

Здесь Ψ_{km} — максимальное потокосцепление катушки (рис. 1.68). На комплексной плоскости потокосцепления и ЭДС изображены векторами Ψ_{km} и \dot{E}_{km} . Проекции этих векторов на действительную ось соответствуют мгновенным значениям потокосцеплений и ЭДС.

Электродвижущая сила катушки

$$e_k = \frac{-d\Psi_k}{dt} = \frac{-d\Psi_{km} \cos(\omega t - \alpha_k)}{dt} = \omega \Psi_{km} \sin(\omega t - \alpha_k). \quad (1.59)$$

Действующее значение ЭДС катушки

$$E_k = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \Psi_{km}. \quad (1.60)$$

На комплексной плоскости из формулы (1.79)

$$\dot{E}_k = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \dot{\Psi}_{km}. \quad (1.61)$$

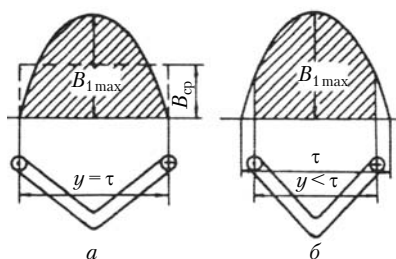


Рис. 1.69. К определению ЭДС в катушке с диаметральной (а) и укороченным (б) шагами

Электродвижущая сила, которая наводится в катушке, зависит от выполнения катушки. В катушке, состоящей из витков с диаметральной шагом (рис. 1.69, а), максимальный поток от 1-й гармоники индукции равен

$$\Phi_m = B_{cp} l_\delta \tau = \frac{2}{\pi} B_{1m} S, \quad (1.62)$$

где B_{1m} — амплитуда индукции первой гармоники; $S = l_\delta \tau$ — площадь, пронизываемая потоком. Тогда ЭДС проводника

$$e_{np} = E_{npm} \sin \omega t, \quad (1.63)$$

где амплитуда ЭДС

$$E_{npm} = B_{1m} l_\delta v = 2f B_{1m} l_\delta \tau. \quad (1.64)$$

Так как

$$v = 2\tau f, \quad (1.65)$$

то

$$E_{np} = \frac{E_{npm}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f B_{1m} l_\delta \tau. \quad (1.66)$$

Для катушки с витками, имеющими укорочение (рис. 1.69, б),

$$\Phi = k_y \Phi_m, \quad (1.67)$$

где k_y — коэффициент укорочения, который учитывает уменьшение ЭДС за счет укорочения шага витков катушки.

При укорочении шага относительный шаг

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (1.68)$$

меньше единицы. При этом ЭДС двух проводников витка $E'_{\text{пр}}$ и $E''_{\text{пр}}$ одинаковые, но сдвинуты по фазе на угол $\beta\pi$ (рис. 1.70). Поэтому ЭДС витка выражается формулой

$$E_{\text{в}} = 2E_{\text{пр}} \sin \frac{\beta\pi}{2}. \quad (1.69)$$

Коэффициент укорочения равен отношению геометрической суммы ЭДС к арифметической сумме:

$$k_y = \sin \frac{\beta\pi}{2}. \quad (1.70)$$

При шаге витка $y \approx 0,8$ $k_y \approx 0,95 \div 0,98$. Можно выполнить катушку с удлиненным шагом, когда $y > 1$. При этом увеличивается длина лобовых частей и растет расход меди. Однако k_y также меньше единицы, так как результирующий поток уменьшается (рис. 1.71, а). При $y = 2\tau$ результирующий поток, пронизывающий контур катушки, равен нулю (рис. 1.71, б).

Поле в воздушном зазоре электрических машин отличается от синусоиды. Высшие гармоники появляются за счет несинусоидального распределения МДС, наличия зубцов на статоре и роторе (рис. 1.72), насыщения и других причин.

Для уменьшения влияния высших гармоник на характеристики машины применяют обмотки с укороченным шагом, выполняют скос пазов и принимают другие меры. Скос пазов выполняется на зубцовое деление статора или ротора и обеспечивает уменьшение влияния высших гармоник, так как в скошенной витке ЭДС от высших гармоник компенсируется (рис. 1.73): ЭДС e'_5 в одной части витка и e''_5 в другой направлены встречно.

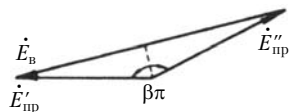


Рис. 1.70. ЭДС витка $E_{\text{в}}$ обмотки с укороченным шагом

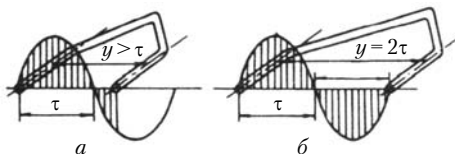


Рис. 1.71. К определению коэффициента укорочения в катушке с удлиненным шагом

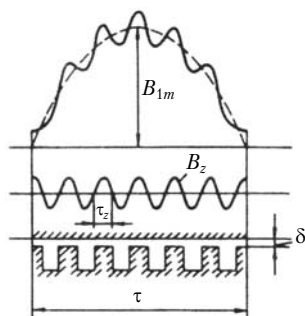


Рис. 1.72. Искривление поля в воздушном зазоре (B_z — индукция зубцовой гармонической)

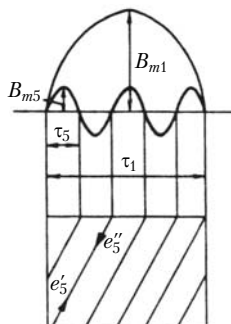


Рис. 1.73. Компенсация ЭДС высших гармоник в витках, лежащих в скошенных пазах

При скосе пазов уменьшается ЭДС и 1-й гармоники. Уменьшение ЭДС 1-й гармоники за счет скоса определяет коэффициент скоса $k_{\text{ск}}$. При скосе пазы статора и ротора расположены под некоторым углом $\gamma_{\text{ск}}$ (рис. 1.74):

$$\gamma_{\text{ск}} = \frac{vb_{\text{ск}}\pi}{\tau}, \quad (1.71)$$

где v — номер гармоники; $b_{\text{ск}}$ — скос, показывающий, насколько сдвинута ось скошенных пазов по сравнению с осью не скошенных. Скос измеряется в миллиметрах или в зубцовых делениях:

$$k_{\text{ск}} = \frac{\sin(\gamma_{\text{ск}}/2)}{0,5\gamma_{\text{ск}}}. \quad (1.72)$$

При скосе, равном зубцовому делению, получаем $k_{\text{ск}}$ для 1-й гармоники близким к единице. Для высших гармоник $k_{\text{ск}}$ существенно меньше единицы.

Скос пазов уменьшает влияние высших гармоник на работу машины, улучшая форму ЭДС и снижает шумы и вибрации. Однако скос пазов увеличивает длину витка, что приводит к увеличению активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния.

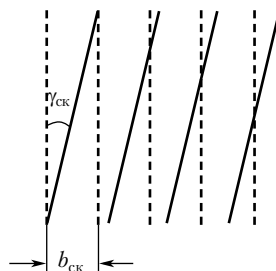


Рис. 1.74. К определению $k_{\text{ск}}$:

----- пазы статора;
—— пазы ротора

Таким образом, ЭДС катушки с учетом коэффициентов k_y и $k_{\text{СК}}$ можно определить следующим образом:

$$E_{\text{К}} = w_{\text{К}} E_{\text{В}} = 2w_{\text{К}} E_{\text{ПР}} = 2\sqrt{2} f w_{\text{К}} k_y k_{\text{СК}} B_{1m} l_{\delta} \tau. \quad (1.73)$$

Поток на полюсном делении

$$\Phi = B_{\text{CP}} l_{\delta} \tau = \frac{2}{\pi} B_{1m} l_{\delta} \tau, \quad (1.74)$$

тогда ЭДС катушки

$$E_{\text{К}} = \pi\sqrt{2} f w_{\text{К}} k_y k_{\text{СК}} \Phi = 4,44 f w_{\text{К}} k_y k_{\text{СК}} \Phi. \quad (1.75)$$

Обычно обмотки электрических машин состоят из катушечных групп. Каждая катушечная группа состоит из q катушек, соединенных последовательно и лежащих в соседних пазах.

Электродвижущая сила катушечной группы E_q равна геометрической сумме ЭДС отдельных катушек, а не арифметической сумме из-за того, что катушки расположены в пазах на внутренней или внешней поверхности цилиндра статора или ротора, сдвинутых относительно друг друга в магнитном поле 1-й гармоники на угол $\alpha = \pi/mq$.

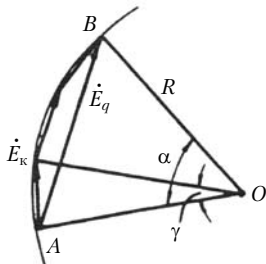


Рис. 1.75. К определению коэффициента распределения k_p

Коэффициент распределения обмотки характеризует уменьшение ЭДС из-за пространственного сдвига катушек по отношению друг к другу и равен (рис. 1.75)

$$k_p = \frac{E_q}{qE_{\text{К}}}. \quad (1.76)$$

Из рис. 1.75 следует, что

$$\begin{aligned} E_q &= 2R \sin(\alpha/2); \\ E_{\text{К}} &= 2R \sin(\gamma/2) = 2R \sin(\alpha/2q). \end{aligned}$$

Тогда коэффициент распределения m -фазной обмотки определится выражением

$$k_p = \frac{\sin(\alpha/2)}{q \sin(\alpha/2q)}. \quad (1.77)$$

Из выражения (1.77) следует, что при $q = 1$ (для одной катушки) $k_p = 1$. При $q > 1$ $k_p < 1$.

При распределенной обмотке, когда $q \rightarrow \infty$, k_p есть отношение хорды AB к длине дуги AB :

$$k_{p\infty} = \frac{\sin(\alpha/2)}{\alpha/2}. \quad (1.78)$$

Значение $k_{p\infty}$ при заданном угле α является наименьшим значением k_p .

При распространенных в практике электромашиностроения числах пазов на полюс и фазу ($q = 2 \div 12$) k_p мало отличается от единицы.

Электродвижущая сила катушечной группы для 1-й гармоники

$$E_{kq} = \pi \sqrt{2} f q w_k k_{об} \Phi_m, \quad (1.79)$$

где $k_{об}$ — обмоточный коэффициент;

$$k_{об} = k_y k_p k_{ск}. \quad (1.80)$$

Обмоточный коэффициент, как правило, меньше единицы: $k_{об} \approx 0,9 \div 0,98$. Коэффициент $k_{об}$ характеризует уменьшение ЭДС в реальной машине за счет укорочения шага обмотки, выполнения ее в пазах на статоре или роторе и наличия скоса пазов.

Произведение $k_{об} w$ называют эффективным числом витков, так как поток полюса во вращающихся электрических машинах в отличие от трансформаторов сцепляется с катушкой не полностью.

Для определения ЭДС фазы обмотки можно воспользоваться выражением (1.79), в котором вместо числа витков в катушечной группе $q w_k$ подставляется число последовательно соединенных витков фазы $w = n q w_k$, где n — число последовательно соединенных катушечных групп:

$$E_\phi = \pi \sqrt{2} f w k_{об} \Phi_m = 4,44 f w k_{об} \Phi_m. \quad (1.81)$$

В обмотках машин переменного тока катушечные группы, лежащие под разными полюсами, содержат одинаковое число катушек и занимают одинаковые дуги на внутренней окружности статора или ротора (или число пазов), поэтому катушечные группы симметричны и в них наводятся одинаковые ЭДС. Эти группы можно соединить последовательно или параллельно.

Число витков фазы обмотки для m -фазной обмотки с числом a параллельных ветвей определяется по формуле

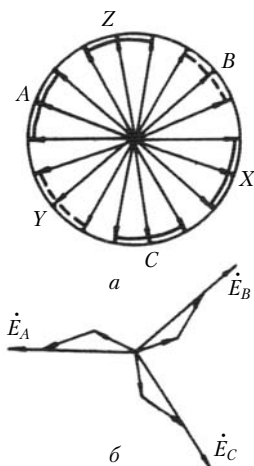


Рис. 1.76. Звезда пазовых ЭДС для трехфазной обмотки ($p = 1$, $q = 3$)

дает возможность определить коэффициент распределения и ЭДС фазы (рис. 1.76, б) для симметричных и несимметричных, двухфазных и многофазных обмоток, когда расчет по формуле (1.81) встречает затруднения. Полученные выше выражения для 1-й гармоники можно распространить на высшие гармоники. Электродвижущая сила фазы от высшей гармоники поля

$$E_{\phi v} = \pi \sqrt{2} f_v w k_{обv} \Phi_{mv}, \quad (1.83)$$

где Φ_{mv} , f_v и $k_{обv}$ — поток, частота и обмоточный коэффициент v -й гармоники.

Так как полюсное деление v -й гармоники τ_v в v раз меньше полюсного деления 1-й гармоники, то магнитный поток v -гармоники

$$\Phi_{mv} = \frac{2}{\pi} B_{vm} l_{\delta} \tau_v = \frac{2}{\pi v} B_{vm} l_{\delta} \tau, \quad (1.84)$$

где B_{vm} — амплитуда v -й гармоники индукции в воздушном зазоре машины. Для временных гармоник $f_v = v f$, а для пространственных гармоник $f_v = f_1$. Обмоточный коэффициент для v -й гармоники

$$k_{обv} = k_{yv} k_{pv} k_{скv}, \quad (1.85)$$

где k_{yv} , k_{pv} , $k_{скv}$ — соответственно коэффициенты укорочения, распределения и скоса для v -й гармоники.

$$w = \frac{z S_n}{2 a m}, \quad (1.82)$$

где S_n — число эффективных проводников в пазу. Эффективный проводник может состоять из одного или нескольких соединенных параллельно витков.

Для определения ЭДС фазы обмотки используется также векторная диаграмма ЭДС катушечной группы, которую называют звездой пазовых ЭДС (рис. 1.76). Звезда пазовых ЭДС на рис. 1.76 дана для трехфазной обмотки $m = 3$, $p = 1$, $q = 3$ (см. рис. 1.53). Электродвижущая сила фазы является векторной суммой ЭДС каждой катушки (см. рис. 1.76). Звезда пазовых ЭДС (рис. 1.76, а)

Относительно v -й гармоники угол сдвига проводников катушки равен $v\beta\pi$ и

$$k_{vv} = \frac{\sin(v\beta\pi)}{2}. \quad (1.86)$$

Коэффициент распределения для v -й гармоники

$$k_{pv} = \frac{\sin(v\pi/2m)}{q\sin(v\pi/2mq)}. \quad (1.87)$$

Угол скоса паза относительно поля v -й гармоники в v раз больше, чем для 1-й гармоники, и коэффициент скоса для v -й гармоники

$$k_{ckv} = \frac{\sin(vb_{ck}\pi/2\tau)}{vb_{ck}\pi/2\tau}. \quad (1.88)$$

Временные гармоники вращаются с той же скоростью, что и 1-я. Пространственные гармоники имеют угловую скорость в v раз меньшую, чем основная гармоника, так как $\tau_v = \tau_1/v$, а $f = f_1$.

Действующее значение полной ЭДС при наличии высших гармоник

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_v^2}, \quad (1.89)$$

где E_1, E_3, \dots, E_v — амплитудные значения ЭДС соответствующих гармоник.

Высшие гармоники искажают ЭДС, и форма напряжения становится несинусоидальной. Несинусоидальность напряжения в сетях и приемниках электрической энергии вызывает дополнительные потери, приводит к ухудшению КПД и $\cos \phi$. Высшие гармоники являются также причиной шумов и вибраций в электрических машинах. Чтобы снизить ЭДС от высших гармоник, стремятся подавить высшие гармоники за счет укорочения шага обмотки, распределения обмотки по пазам (выбора достаточно большого q) и скоса пазов.

На форму ЭДС оказывает также влияние выбор схемы соединения обмоток.

В многофазных системах применяются в основном два соединения — в многофазную звезду и в многоугольник. В трехфазной системе, применяющейся в энергетике, во вращающихся машинах используются соединения в звезду и треугольник (рис. 1.77).

В трехфазных системах особое положение имеют 3-я гармоника и кратные ей нечетные гармоники ($v = 9, 15, 21$

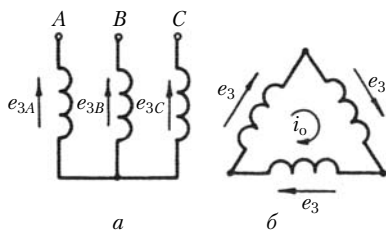


Рис. 1.77. Соединение обмоток в звезду (а) и треугольник (б)

А, В и С совпадают по фазе и при соединении в звезду в линейных напряжениях эти гармоники отсутствуют (см. рис. 1.77). При соединении обмоток в треугольник ЭДС гармоник, кратных трем, складываются и создают ток, циркулирующий внутри обмоток. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании электрических машин и трансформаторов.

Как правило, высшие гармоники ухудшают характеристики и энергетические показатели электрических машин. Высших гармоник поля нет только в идеальной электрической машине, в зазоре которой имеется круговое поле. При проектировании электрических машин стремятся поле в машине максимально приблизить к синусоидальному [11].

1.12. Магнитодвижущие силы обмоток

Магнитное поле в электрических машинах создается токами, протекающими в обмотках. Если допустить, что равномерный гладкий зазор машины δ

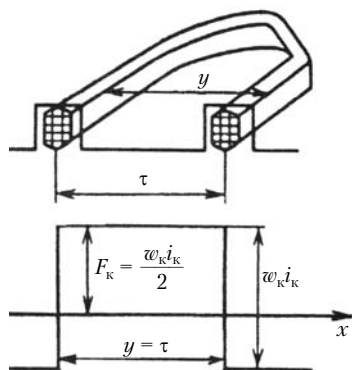


Рис. 1.78. МДС катушки при $y = \tau$

мал по сравнению с диаметром ротора и полюсным делением и машина не насыщена, то форма магнитного поля определяется формой МДС.

Магнитодвижущая сила катушки с диаметральной шаг (рис. 1.78) при принятых допущениях без учета толщины катушки равна

$$2F_k = w_k i_k. \quad (1.90)$$

Катушка имеет два полюса (северный и южный), поэтому на один полюс принимается F_k .

и т.д.). В пятифазных системах особое место занимают 5-я гармоника и кратные ей гармоники и т.д.

В трехфазной системе в фазах А, В, С 1-е гармоники сдвинуты на 120° относительно друг друга. Электродвижущие силы гармоник, кратных трем, в фазах

Прямоугольную волну МДС можно разложить в ряд Фурье:

$$F_k = \sum_{1,3,\dots,n} F_{kv} \cos \omega t \cos \nu \alpha. \quad (1.91)$$

Магнитодвижущая сила катушки состоит из бесконечного ряда нечетных гармоник, каждая из которых изменяется по гармоническому закону в пространстве ($\cos \nu \alpha$) и во времени ($\cos \omega t$).

При обтекании катушки переменным током амплитудное значение первой гармоники МДС

$$F_{1m} = \frac{4\sqrt{2}}{2\pi} w_k i_k. \quad (1.92)$$

Магнитодвижущая сила двух катушек с укороченным шагом $y < \tau$ (рис. 1.79) может быть представлена в виде трапеции. При разложении в гармонический ряд трапецидальной МДС амплитуды высших гармоник значительно меньше, чем при прямоугольной МДС.

Магнитодвижущая сила катушечной группы имеет ступенчатый вид и еще ближе приближается к синусоиде (см. рис. 1.80).

Магнитодвижущая сила фазы равняется сумме МДС системы катушек, составляющих обмотку.

Для трехфазной обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу, в фазах которой протекают токи

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2} I \cos \omega t, \\ i_b = \sqrt{2} I \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ i_c = \sqrt{2} I \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{cases} \quad (1.93)$$

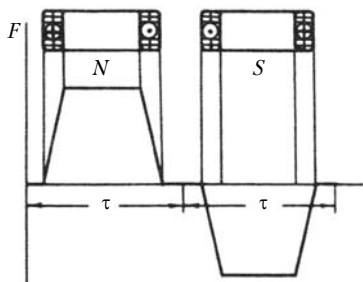


Рис. 1.79. МДС катушки при $y < \tau$

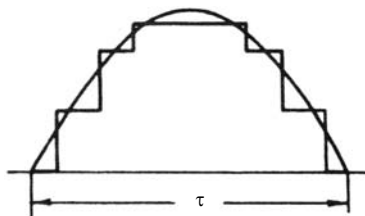


Рис. 1.80. МДС катушечной группы

результатирующее поле получается при сложении пар пульсирующих волн МДС каждой фазы:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{av} = \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cos(\omega t - v\alpha) + \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cos(\omega t + v\alpha); \\ F_{bv} = \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cos \left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - v \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \\ + \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cos \left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + v \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ F_{cv} = \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cos \left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) - v \left(\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \right] + \\ + \frac{1}{2} F_{\Phi v} \cos \left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + v \left(\alpha - \frac{4\pi}{3} \right) \right], \end{array} \right. \quad (1.93a)$$

где $F_{\Phi v} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{o6v}}{vp} I$ — амплитудное значение v -й гармонической МДС фазы.

При суммировании прямые последовательности создают изменяющиеся по синусоидальному закону МДС с амплитудой $\frac{3}{2} F_{\Phi v}$, а обратные последовательности поля не создают.

Для 1-й гармоники МДС трехфазной обмотки

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\Phi 1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{o61}}{p} I = 1,35 \frac{\omega k_{o61}}{p} I. \quad (1.94)$$

Здесь

$$F_{\Phi 1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{o61}}{p} I = 0,9 \frac{\omega k_{o61}}{p} I,$$

где ток фазы равен $I = I_k a$ (a — число параллельных ветвей обмотки) (1.93).

В общем случае МДС для m -фазной обмотки для v -й гармоники

$$F_v = \frac{m}{2} F_{\Phi v} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{o6v}}{vp} I. \quad (1.95)$$

Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки в симметричной машине представляет собой периодически изменяющуюся кривую, поэтому при разложении в гармонический ряд четные гармоники отсутствуют.

Нечетные гармоники трехфазной обмотки можно разбить на три бесконечных спектра: высшие гармоники с номерами $6n + 1$, $6n - 1$ (где n — простые целые числа) и гар-

моники, кратные трем (3, 9, 15 и т.д.). Гармоники ряда $6n + 1$ (7, 13, 19-я и т.д.) вращаются в ту же сторону, что и 1-я гармоника, соответственно с синхронной угловой скоростью, меньшей в v раз по сравнению с синхронной угловой скоростью 1-й гармоники (ω_{ci}).

Гармоники ряда $6n - 1$ (5, 11, 17-я и т.д.) вращаются в сторону, противоположную вращению 1-й гармоники, с синхронными частотами вращения ω_{ci}/v . По отношению к этому ряду гармоник машина находится в тормозном режиме.

Гармоники, кратные трем, так же как и 3-я гармоника в трехфазной системе, замыкаются внутри треугольника и создают поле, близкое по характеру влияния на рабочие процессы полю нулевой последовательности.

Для определения МДС обмоток часто применяется графический способ, в основе которого лежит принцип наложения. В местах расположения катушек МДС изменяется скачком, а на участках без тока МДС не изменяется (рис. 1.81). Суммируя МДС на участках, можно определить результирующую F .

Проведем построение МДС для трехфазной двухслойной обмотки $2p = 4$, $q = 2$, $z = 24$ с шагом $y = \frac{5}{6}\tau$ (см. рис. 1.64). После того как будет начерчен график распределения фазных зон для обмотки (рис. 1.81, a и z), для одного из положений векторной диаграммы определяются токи в фазах обмотки, а затем и результирующие токи в пазу (рис. 1.81, b и e). Для момента времени, которому соответствует векторная диаграмма рис. 1.81, b , токи $i_B = i_c = -\frac{1}{2}I_m$, а ток $i_A = I_m$, где $I_m = \sqrt{2}I$. С учетом направлений токов и их амплитуд определяем результирующие токи в пазах (см. рис. 1.81, b) и распределение МДС по статору (см. рис. 1.81, z).

Такие же построения повторяются для другого момента времени, и строятся распределения токов и МДС (см. рис. 1.81, $b - e$). Для векторной диаграммы рис. 1.84, d $i_B = 0$, а $i_A = -i_c = \frac{\sqrt{3}}{2}I_m$.

Для симметричных обмоток с целым q кривые токов и МДС симметричны относительно оси абсцисс. При повороте векторной диаграммы фазных токов, т.е. при изменении времени, максимум МДС перемещается относительно статора. Таким образом, в воздушном зазоре образуется вращающееся магнитное поле.

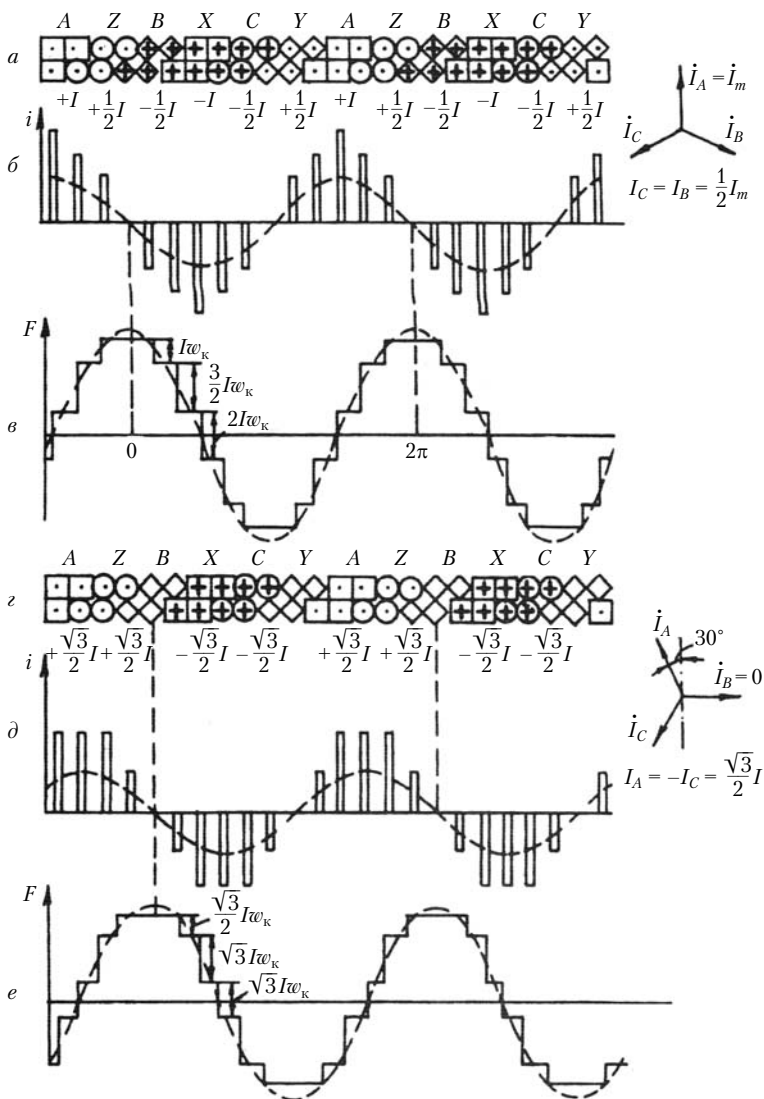


Рис. 1.81. Построение МДС трехфазной обмотки

Форма МДС изменяется во времени, а ее вид зависит от выполнения обмотки — одно- или двухслойной, числа пазов на полюс и фазу q и укорочения. Кривая приближается к синусоиде, когда q увеличивается, а укорочение $y \approx 0,8\tau$. Одна-

ко синусоидальное распределение МДС возможно только при синусоидальном неравномерном распределении витков в пазах машины. Обмотки с синусоидальной МДС называются синусными. Они применяются только в специальных машинах.

Обмотки с дробным q имеют несимметричную кривую МДС, и она может иметь различный вид под разными парами полюсов. Графическое построение МДС для обмоток с дробным q проводится так же, как и для обычных обмоток.

1.13. Электромагнитный момент

В ЭП самой удивительной особенностью перед другими преобразователями энергии является электромагнитный момент ($M_{эм}$), который при электромеханическом преобразовании энергии возникает там, где сконцентрирована энергия магнитного поля.

Подойти к определению $M_{эм}$ можно, рассматривая уравнения поля или уравнения цепей. Оба подхода правомерны, так как рассматривают одно и то же явление. В природе, а также во всех ЭП не бывает токов без магнитных полей, так же как всегда магнитные поля создаются контурами, в которых протекают токи.

Механическое, или пондеромоторное, взаимодействие токов подчиняется закону Ампера. Для проводника с током \bar{I} , находящегося во внешнем магнитном поле \bar{B} , электромагнитная сила \bar{F} определяется векторным произведением:

$$\bar{F} = [l\bar{B}]\bar{I}, \quad (1.96)$$

где l — единичный вектор длины проводника с током \bar{I} .

Когда в результате применения уравнений Максвелла определено магнитное поле, электромагнитные силы удобно выразить через так называемый тензор натяжения:

$$\bar{T}_n = \mu_0 H_n \bar{H} - \mu_0 \frac{\bar{n}H^2}{2}, \quad (1.97)$$

где H_n — составляющая вектора напряженности магнитного поля \bar{H} в направлении орта \bar{n} , нормального к рассматриваемому участку поверхности; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Интегрируя тензор натяжения по всем поверхностям, на которых имеет место существенное значение магнитного поля, можно перейти к значениям электромагнитных сил и момента.

Иногда целесообразно определять электромагнитные силы и моменты из выражения удельной энергии, равной скалярному произведению плотности тока и векторного потенциала стороннего магнитного поля:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{2} \bar{A} \bar{J} = \frac{1}{2} \bar{B} \bar{H}. \quad (1.98)$$

Теория цепей дает более наглядное определение сил и моментов, и она получила в электрических машинах наибольшее распространение. В теории электрических цепей электромагнитный момент определяется произведением всех токов, протекающих в контурах электрической машины.

Обращаясь к модели обобщенной электрической машины (см. рис. 1.25), можно выделить три составляющие (три сорта пар произведений токов): произведения токов, протекающих в статоре и роторе в разных осях машины, произведения токов в статоре и роторе по одной оси и произведения токов статора и ротора в разных осях машины.

Для простейшей обобщенной машины электромагнитный момент

$$\begin{aligned} M_{\text{эм}} &= M_{\text{вр}} + M_{\text{виб}} + M_{\text{деф}} = \\ &= M(i_{\alpha}^r i_{\beta}^s - i_{\beta}^r i_{\alpha}^s) + M(i_{\alpha}^s i_{\alpha}^r - i_{\beta}^s i_{\beta}^r) + M^s i_{\alpha}^s i_{\beta}^s + M^r i_{\alpha}^r i_{\beta}^r, \end{aligned} \quad (1.99)$$

где $M_{\text{вр}}$ — вращающий; $M_{\text{виб}}$ — вибрационный; $M_{\text{деф}}$ — деформационный моменты; M , M^s , M^r — взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора, между обмотками статора и между обмотками ротора; i_{α}^s , i_{β}^s , i_{α}^r , i_{β}^r — соответственно токи статора и ротора по осям α и β .

В электрических машинах $M \gg M^s \approx M^r$. Взаимные индуктивности между обмотками статора или ротора определяются в основном потоками рассеяния в лобовых частях обмоток, которые замыкаются по воздуху.

Почти во всех электрических машинах основную роль в $M_{\text{эм}}$ играет вращающий момент; $M_{\text{виб}}$ определяет вибрации и шумы электрических машин; $M_{\text{деф}}$ значительно меньше двух других составляющих $M_{\text{эм}}$. $M_{\text{деф}}$ определяет деформации лобовых частей обмоток электрических машин, от которых зависит надежность электрических машин.

Так как взаимная индуктивность между лобовыми частями обмоток статора или ротора много меньше взаимной индуктивности обмоток статора и ротора, определяемой рабочим потоком, деформационный момент в большинстве случаев можно не учитывать.

$M_{\text{виб}}$ создает вибрации и шумы, действуя на ротор и статор в радиальном направлении с двойной частотой по отношению к частоте токов.

В первом приближении, при некруговом поле при определении шумов и вибраций можно использовать только одну составляющую $M_{\text{виб}}$.

В установившихся режимах при наличии кругового поля в воздушном зазоре можно считать, что электромагнитный момент равен вращающему моменту $M_{\text{эм}} = M_{\text{вр}}$, а $M_{\text{виб}}$ и $M_{\text{деф}}$ равны нулю. В динамике и при несинусоидальном поле необходимо делать соответствующие оговорки, если используется только одна составляющая $M_{\text{эм}}$.

При определении $M_{\text{эм}}$ симметричной многофазной машины ее приводят к эквивалентной двухфазной

$$M_{\text{эм}} = \frac{m}{2} M(i_{\beta}^s i_{\alpha}^r - i_{\alpha}^s i_{\beta}^r), \quad (1.100)$$

где m — число фаз.

Если в обмотках статора и ротора электрической машины (см. рис. 1.25) будет протекать постоянный ток, то через некоторое время обмотки остановятся в нейтральном положении. Чтобы непрерывно создавался электромагнитный момент, необходимо создать вращающееся поле. При этом в обмотках статора и ротора должны протекать переменные токи или в одной из обмоток (статора или ротора) постоянный ток, а в другой — переменный.

Образование электромагнитного момента при протекании переменных токов показано на рис. 1.82. Произведения токов при изменении знаков токов в статоре и роторе знака не изменяют, а когда токи в статоре и роторе имеют различные направления, знак электромагнитного момента изменяется.

При сдвиге токов статора относительно токов в роторе из-за наличия реактивной составляющей произведения токов дают среднюю составляющую момента, зависящую от сдвига токов в статоре и роторе (см. рис. 1.82).

Электромагнитный момент обобщенного

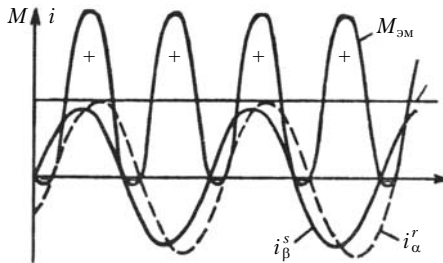


Рис. 1.82. Электромагнитный момент электрической машины

электромеханического преобразователя определяется произведениями всех токов, протекающих в обмотках машины.

Пары произведений токов во вращающем моменте можно разделить на две группы. К первой группе относятся члены, создающие вращающие, тормозные или генераторные моменты, ко второй — создающие пульсирующие моменты. Первые создаются полями статора и ротора, неподвижными относительно друг друга. Пульсирующие моменты создаются полями, перемещающимися относительно друг друга.

Пульсирующие моменты вызывают вибрации и не создают средней составляющей момента в установившемся режиме.

Электромагнитный момент определяет основные показатели всех электрических машин, и к нему мы будем обращаться в каждом разделе учебника.

1.14. Уравнения электромеханического преобразования энергии

Любая теория приобретает значение для практических применений, если она имеет математическое описание. Наряду с так называемыми физическими представлениями математические модели в электромеханике имеют первостепенное значение.

Подходя к изучению теории электрических машин в начале XXI в., как и электромеханики в начале XX в., естественно, попытаемся написать уравнения так, как это видит наблюдатель, находящийся вне машины. Поскольку модель обобщенной электрической машины подходит для большинства машин, для нее целесообразно записать уравнения электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим двухфазную двухполюсную электрическую машину, имеющую две ортогональные системы обмоток статора w_a^s, w_b^s и ротора w_a^r, w_b^r (рис. 1.83). При работе машины обмотки статора и ротора перемещаются относительно друг друга, а угол θ между осями обмоток определяет относительную частоту вращения. При неподвижном статоре

$$\omega_p = \frac{d\theta}{dt}. \quad (1.101)$$

С осями обмоток (см. рис. 1.83) удобно совместить координатные оси статора (a_s, b_s) и ротора (a_r, b_r). При этом можно говорить об относительном перемещении как обмоток статора и ротора относительно друг друга, так и координат-

ных осей (a_s, b_s и a_r, b_r). Эти оси в теории электрических машин получили название естественных, или фазовых, непреобразованных координат.

Можно предположить, что с осями обмоток совпадают векторы потоко-сцеплений обмоток ($\Psi_a^s, \Psi_b^s, \Psi_a^r$ и Ψ_b^r) и токов обмоток (i_a^s, i_b^s, i_a^r и i_b^r) (см. рис. 1.83).

При вращении ротора обмотки статора и ротора изменяют положение относительно друг друга и при этом изменяются их потоко-сцепления и токи. Потоко-сцепления обмоток статора с обмоткой ротора зависят от угла θ между осями обмоток и определяются следующими соотношениями:

$$\begin{cases} \Psi_a^s = L_a^s i_a^s + M \cos \theta i_a^r - M \sin \theta i_b^r, \\ \Psi_b^s = L_b^s i_b^s + M \cos \theta i_b^r + M \sin \theta i_a^r, \\ \Psi_a^r = L_a^r i_a^r + M \cos \theta i_a^s + M \sin \theta i_b^s, \\ \Psi_b^r = L_b^r i_b^r + M \cos \theta i_b^s - M \sin \theta i_a^s, \end{cases} \quad (1.102)$$

где $L_a^s, L_b^s, L_a^r, L_b^r$ — соответственно полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям a, b ; M — взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора.

Полная индуктивность, например, обмотки статора по оси a :

$$L_a^s = M + L_{\sigma a}, \quad (1.103)$$

где $L_{\sigma a}$ — индуктивность рассеяния обмотки статора по оси a .

В воздушном зазоре машины благодаря определенной комбинации обмоток в пространстве и временному сдвигу токов и напряжений образуется вращающееся поле. При синусоидальных напряжениях на выводах идеальной машины в воздушном зазоре имеется круговое поле. Частоты токов в статоре и роторе в соответствии с третьим законом электро-механики жестко связаны между собой, и поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга.

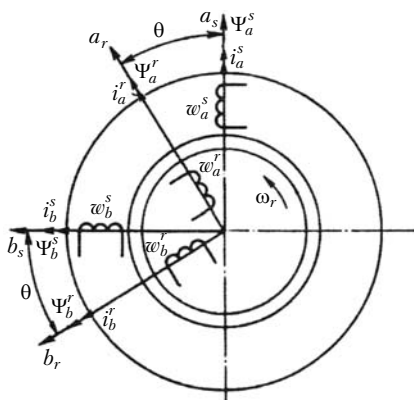


Рис. 1.83. Модель обобщенной машины в непреобразованной системе координат

Круговое поле в воздушном зазоре можно представить результирующими векторами индукции

$$\tilde{B}^s = B_a^s + jB_b^s; \quad \tilde{B}^r = B_a^r + jB_b^r \quad (1.104)$$

и потокосцеплений

$$\tilde{\Psi}^s = \Psi_a^s + j\Psi_b^s; \quad \tilde{\Psi}^r = \Psi_a^r + j\Psi_b^r. \quad (1.105)$$

В выражениях (1.104) и (1.105) составляющие индукции и потокосцеплений есть проекции на оси координат статора и ротора (см. рис. 1.83).

В виде результирующих векторов можно представить напряжения статора и ротора \tilde{U}^s, \tilde{U}^r , а также токи статора и ротора \tilde{I}^s, \tilde{I}^r .

Для результирующих векторов уравнения напряжений записываются в следующем виде:

$$\tilde{U}^s = \tilde{I}^s R^s + \frac{d\tilde{\Psi}^s}{dt}; \quad \tilde{U}^r = \tilde{I}^r R^r + \frac{d\tilde{\Psi}^r}{dt}. \quad (1.106)$$

Так как рассматривается симметричная машина, активные сопротивления обмоток по осям статора равны $R^s = r_a^s = r_b^s$ и $R^r = r_a^r = r_b^r$.

Из уравнений (1.106) после разложения результирующих векторов на составляющие по координатным осям получим дифференциальные уравнения напряжений в естественных или фазовых преобразованных координатах:

$$\begin{cases} u_a^s = i_a^s r_a^s + \frac{d\Psi_a^s}{dt}, \\ u_b^s = i_b^s r_b^s + \frac{d\Psi_b^s}{dt}, \\ -u_a^r = i_a^r r_a^r + \frac{d\Psi_a^r}{dt}, \\ -u_b^r = i_b^r r_b^r + \frac{d\Psi_b^r}{dt}. \end{cases} \quad (1.107)$$

В уравнениях (1.107) частоты токов статора и ротора различны, поэтому токи и потокосцепления обмоток статора и ротора имеют также различные частоты, коэффициенты взаимной индуктивности и полной индуктивности перед токами в уравнениях (1.102) изменяются с двойной частотой по отношению к токам и напряжению. Знак «-» в уравнениях ротора в уравнениях (1.107) свидетельствует о том, что активная мощность поступает со статора в ротор.

Если подставить значения потокосцеплений из уравнений (1.102) в уравнения (1.107), получим громоздкие уравнения с периодическими коэффициентами. Чтобы упростить эти уравнения, надо преобразовать их к уравнениям с постоянными коэффициентами.

В теории электрических машин широко применяется преобразование координат. Преобразование координат осуществляется при условии инвариантности (неизменности) мощности.

При преобразовании координат наблюдатель (система координат) располагается в воздушном зазоре и может вращаться с любой скоростью. При вращении наблюдателя с произвольной скоростью ω_k , при неподвижном статоре, частота напряжения в этой системе координат равна $\omega_c \pm \omega_k$. Эту систему координат обозначают u, v , и она используется для исследования машин с вращающимся статором и ротором.

Можно иметь бесконечное число координат, соответствующих любой скорости ω_k . В теории электрических машин применяется ограниченное число координат. Неподвижные координаты ($\omega_k = 0$) получили название координат α, β . В координатах α, β наблюдатель рассматривает процессы преобразования энергии со стороны неподвижного статора. Система координат α, β широко применяется для исследования асинхронных машин.

Для исследования синхронных машин применяют систему координат d, q . При этом $\omega_k = \omega_p = \omega_c$, а наблюдатель «помещается» на ротор. Находясь на роторе, наблюдатель «видит» в воздушном зазоре неподвижные относительно ротора поля статора и ротора. Если мысленно остановить ротор, картина для наблюдателя не изменится. Моделирование уравнений в системе координат d, q на ЭВМ производится на постоянном токе. В системе координат α, β моделирование уравнений производится на переменном токе.

Системы координат α, β и d, q — наиболее распространенные. Естественные непреобразованные координаты и координаты, вращающиеся с произвольной скоростью, применяются реже. Вопрос о применении и преобразовании координат подробно рассматривается в специальных курсах [7].

Уравнения электромеханического преобразования, записанные через токи, в системе координат α, β для обобщенной машины (см. рис. 1.25) выглядят следующим образом:

$$\begin{vmatrix} u_{\alpha}^s \\ u_{\alpha}^r \\ u_{\beta}^r \\ u_{\beta}^s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{\alpha}^s + \frac{d}{dt}L_{\alpha}^s & \frac{d}{dt}M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}M & r_{\alpha}^r + \frac{d}{dt}L_{\alpha}^r & L_{\beta}^r\omega_p & M\omega_p \\ -M\omega_p & -L_{\alpha}^r\omega_p & r_{\beta}^r + \frac{d}{dt}L_{\beta}^r & \frac{d}{dt}M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt}M & r_{\beta}^s + \frac{d}{dt}L_{\beta}^s \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{\alpha}^s \\ i_{\alpha}^r \\ i_{\beta}^r \\ i_{\beta}^s \end{vmatrix}, \quad (1.108)$$

где $u_{\omega}^s, u_{\beta}^s, u_{\alpha}^r, u_{\beta}^r, i_{\omega}^s, i_{\beta}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r$ — соответственно напряжения и токи в обмотках статора и ротора по осям α и β ; $r_{\alpha}^s, r_{\beta}^s, r_{\alpha}^r, r_{\beta}^r$ — активные сопротивления обмоток статора и ротора; M — взаимная индуктивность; $L_{\alpha}^s, L_{\beta}^s, L_{\alpha}^r, L_{\beta}^r$ — полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям α и β .

Индуктивности обмоток:

$$\begin{cases} L_{\alpha}^s = M + L_{\alpha\sigma}^s, \\ L_{\alpha}^r = M + L_{\alpha\sigma}^r, \\ L_{\beta}^s = M + L_{\beta\sigma}^s, \\ L_{\beta}^r = M + L_{\beta\sigma}^r, \end{cases} \quad (1.109)$$

где $L_{\alpha\sigma}^s, L_{\beta\sigma}^s, L_{\alpha\sigma}^r, L_{\beta\sigma}^r$ — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора по осям α и β .

Индуктивные и активные сопротивления относятся к фазе машины и определяются расчетным или опытным путем по схемам замещения и формулам проектирования.

Уравнения напряжений для неподвижных обмоток в обычной записи имеют вид

$$u_{\alpha}^s = r_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^s \frac{d}{dt} i_{\alpha}^s + M \frac{d}{dt} i_{\alpha}^r, \quad (1.110)$$

а для вращающихся обмоток

$$u_{\alpha}^r = M \frac{d}{dt} i_{\alpha}^s + r_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + L_{\alpha}^r \frac{d}{dt} i_{\alpha}^r + L_{\beta}^r \omega_p i_{\beta}^r + M \omega_p i_{\beta}^s. \quad (1.111)$$

Уравнения (1.108) записаны для приведенной машины с псевдонеподвижными обмотками, у которой одинаковое число витков на статоре и роторе. Чтобы сохранить инвариантность мощности в реальной машине и машине с неподвижными обмотками, в уравнения вводят ЭДС вращения, выражающиеся произведениями $L_{\beta}^r \omega_p i_{\beta}^r + M \omega_p i_{\beta}^s$ для обмотки ротора по оси α и $-L_{\alpha}^r \omega_p i_{\alpha}^r - M \omega_p i_{\alpha}^s$ — по оси β .

Уравнения Кирхгофа (1.108) включают в себя напряжения, падения напряжения на активных сопротивлениях, ЭДС вращения, которые индуцируются только во вращающихся обмотках, и трансформаторные ЭДС:

$$\begin{cases} L_{\alpha}^s \frac{d}{dt} i_{\alpha}^s + M \frac{d}{dt} i_{\alpha}^r, \\ M \frac{d}{dt} i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^r \frac{d}{dt} i_{\alpha}^r, \\ L_{\beta}^s \frac{d}{dt} i_{\beta}^s + M \frac{d}{dt} i_{\beta}^r, \\ M \frac{d}{dt} i_{\beta}^s + L_{\beta}^r \frac{d}{dt} i_{\beta}^r. \end{cases} \quad (1.112)$$

Процессы электромеханического преобразования энергии описываются уравнениями напряжений (1.108) и уравнением движения

$$M_{\text{вр}} = \frac{1}{p} J \frac{d\omega_p}{dt} \pm M_c, \quad (1.113)$$

где M_c — момент нагрузки на валу или момент сопротивления; J — момент инерции. Если электрическая машина исследуется вместе с приводным механизмом, необходимо учитывать и приведенный момент инерции механизма. Знаки перед M_c в уравнении (1.113) определяют двигательный или генераторный режим работы.

Электромагнитный момент определяется (параграф 1.13) по формуле (1.100).

Системы координат α , β , d , q и u , v наиболее распространены и позволяют составить уравнения практически для всех встречающихся задач. Выбор системы координат упрощает уравнения, позволяет получить уравнения с постоянными коэффициентами, но не снижает числа неизвестных.

Выраженные в той или иной системе координат уравнения преобразовываются в соответствии с правилами математики. Одним из важных приемов преобразования является замена переменных:

$$\begin{cases} i_{0\alpha} = i_{\alpha}^s + i_{\alpha}^r, \\ i_{0\beta} = i_{\beta}^s + i_{\beta}^r, \end{cases} \quad (1.114)$$

где $i_{0\alpha}$, $i_{0\beta}$ — мгновенные составляющие тока холостого хода по осям α и β .

Уравнения напряжений и моментов могут быть выражены через потокосцепления, токи статора и ротора, намагничивающие токи и потокосцепления [7].

Системы из четырех уравнений напряжений и уравнения моментов являются фундаментальными уравнениями электромеханического преобразования энергии, записанными в различных системах координат.

В простейшем виде уравнения электромеханического преобразования энергии представляют собой систему из пяти уравнений. В них пять независимых (напряжения и момент сопротивления) и пять зависимых (токи и угловая скорость) переменных. Коэффициенты перед зависимыми переменными (активные сопротивления, индуктивности, взаимные индуктивности и момент инерции) являются параметрами. В зависимости от вида уравнений коэффициенты при переменных могут быть постоянными, периодическими и нелинейными.

Дифференциальные уравнения электромеханического преобразования энергии не имеют точного аналитического решения, так как они содержат произведения переменных. Для их решения применяют ЭВМ. Точность решения уравнений электромеханического преобразования энергии зависит от класса ЭВМ. Можно решить уравнения (1.108), (1.113) с помощью ЭВМ с такой высокой точностью, которая даже не требуется для инженерной задачи.

Уравнения электромеханического преобразования энергии не имеют решения, если любой из параметров, входящих в уравнения, равен нулю или бесконечности. Если активные или индуктивные сопротивления равны бесконечности, токи равны нулю и машина не развивает момента. При $J = \infty$ машина разгоняется бесконечно долго. При $J = 0$ машина не может достигнуть установившейся скорости, так как ротор реагирует на все изменения произведений токов, создающих момент, и не разгоняется. При этом средняя составляющая электромагнитного момента отсутствует. При равенстве взаимной индукции нулю нет магнитной связи между обмотками статора и ротора и электромагнитный момент равен нулю (1.114). Если в контурах электрической машины, где замыкаются токи, активные сопротивления равны нулю, устройство работает как накопитель энергии. При этом постоянные времени равны бесконечности, между токами статора и ротора, создающими $M_{эм}$, сдвиг 90° , средний электромагнитный момент равен нулю (см. рис. 1.83).

Дифференциальные уравнения электромеханического преобразования энергии описывают переходные и установившиеся режимы. Уравнения установившегося режима при синусоидально изменяющихся токах и напряжениях получаются из дифференциальных уравнений путем замены оператора дифференцирования d/dt на $j\omega$. Вывод уравнений для установившегося режима для каждого типа электрических машин проводится в соответствующих параграфах курса.

В установившихся режимах, когда $\omega_p = 0$, можно уравнения напряжений и уравнение движения рассматривать отдельно и использовать для их анализа аналитические решения. В курсе электрических машин для анализа установившихся режимов, как правило, используются уравнения напряжений, а при изучении работы электрических машин в электроприводах — уравнение движения.

При изучении электрических машин исследование уравнений электромеханического преобразования на ЭВМ имеет огромное значение. Применение вычислительных машин для решения задач электромеханики в последние десятилетия имели решающее значение для развития теории электрических машин.

Математической теорией электрических машин студенты-электромеханики занимаются практически во всех спецкурсах. В общем курсе уравнений электромеханического преобразования энергии касаемся лишь в необходимой степени для изучения основных положений теории электрических машин.

1.15. Параметры электрических машин

Параметры электрических машин — это коэффициенты перед независимыми переменными в уравнениях, описывающих электромеханическое преобразование энергии. Обычно независимые переменные — это токи. Уравнения могут быть как дифференциальными, так и комплексными или алгебраическими. Наиболее строгое описание процессов электромеханического преобразования энергии дают дифференциальные уравнения.

Параметрами электрических машин являются активные и индуктивные сопротивления и момент инерции. Вместо индуктивных сопротивлений удобно применять индуктивности — полные, взаимные и рассеяния. Таким образом, L ,

M , L_σ , r обмоток машины и момент инерции J есть параметры машины.

Обычно параметры относят к фазе машины (за исключением момента инерции), что облегчает их опытное определение и запись уравнений преобразования энергии.

Активное сопротивление фазы обмотки определяется по формуле

$$r_0 = \rho_v \frac{l_{\text{пр}}}{q_{\text{пр}}} k_r, \quad (1.115)$$

где $l_{\text{пр}}$ — длина проводника; $q_{\text{пр}}$ — поперечное сечение проводника; k_r — коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления за счет неравномерного распределения тока по сечению проводника; ρ_v — удельное сопротивление материала проводника, которое зависит от температуры обмоток, поэтому при расчетах сопротивление приводится к расчетной температуре, равной 75°C . В табл. 1.3 приведены значения ρ_v для медных и алюминиевых обмоток.

Таблица 1.3

Материал обмотки	Удельное сопротивление материала обмотки, 10^{-6} Ом·м, при температуре, $^\circ\text{C}$		
	20	75	115
Медь	$\frac{1}{57}$	$\frac{1}{47}$	$\frac{1}{41}$
Алюминий	$\frac{1}{35}$	$\frac{1}{28}$	$\frac{1}{26}$
Алюминий литой	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{24}$	$\frac{1}{22}$

Неравномерное распределение переменного тока по сечениям проводников, расположенных в пазу, происходит за счет различного индуктивного сопротивления проводников, лежащих на дне паза и у клина. Неравномерное распределение тока может иметь место в параллельных ветвях катушечных обмоток, не лежащих в пазу, когда параллельные ветви находятся в различных условиях и имеют отличающиеся сопротивления. Чтобы уменьшить k_r , применяют транспозицию витков. Проводники, принадлежащие различным параллельным ветвям обмотки, располагают так, чтобы все параллельные ветви находились в одинаковых

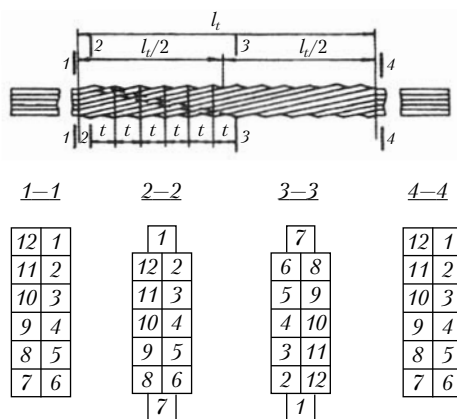


Рис. 1.84. Транспозиция обмотки статора турбогенератора

условиях. Существует несколько способов выполнения транспозиции, которые можно разделить на два вида — с транспозицией проводников в пазовой и в лобовой частях обмотки.

На рис. 1.84 приведен пример выполнения транспозиции в пазовой части обмотки статора турбогенератора. Плетеный стержень состоит из медных проводников сечением 10–20 мм², занимающих попеременно все возможные положения по высоте и длине паза. Транспозиция осуществляется путем выгиба на ребро проводников. Выгибы отдельных проводников смещены относительно друг друга на определенную величину, называемую шагом плетения. Плетеный стержень состоит из двух половин, которые формируются в один стержень.

В большинстве машин стержни обмотки имеют транспозицию, когда каждый элементарный проводник совершает один полный оборот вокруг оси стержня на протяжении длины активной части. При этом шаг плетения равен $t = \frac{l_s}{2n}$, где l_s — активная длина машины; n — число элементарных проводников. Расстояние между двумя выгибами на ребро равно $\frac{l_s}{2}$.

На рис. 1.84 показаны сечения стержня обмотки в четырех плоскостях. В исходном сечении 1–1 и в конечном 4–4 положения элементарных проводников совпадают.

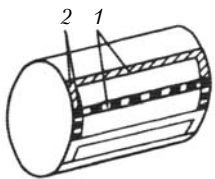


Рис. 1.85. К определению сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора

В электромашиностроении применяются и другие виды транспозиции, которые рассматриваются в соответствующих главах книги.

При определении сопротивления короткозамкнутых обмоток считают, что число фаз короткозамкнутой обмотки равно числу стержней, т.е. $m_2 = z_2$, где m_2 — число фаз ротора; z_2 — число пазов ротора. Обмотка каждой из фаз состоит из одного стержня 1 и двух частей короткозамыкающего кольца 2 (рис. 1.85).

Определение индуктивностей и индуктивных сопротивлений расчетным и опытным путями относится к наиболее важному и трудному разделу теории электрических машин. Наличие многих контуров, насыщение затрудняют определение индуктивностей. При определении индуктивностей следует иметь в виду, что индуктивности относятся к фазе обмотки, а рабочее магнитное поле — общее для машины и создается токами, протекающими во всех фазах обмотки машины. Если по обмотке фазы протекает ток с амплитудным значением $\sqrt{2}I$, то из выражения (1.94) амплитудное значение МДС обмотки фазы по 1-й гармонике

$$F_{1m} = \frac{2\sqrt{2}I\omega k_{o61}}{\pi p}. \quad (1.116)$$

Эта МДС создает в воздушном зазоре магнитное поле с индукцией

$$B_{1m} = \mu_0 F_{1m} \lambda_0 = \frac{2\sqrt{2}I\omega k_{o61}\mu_0}{\pi p \delta k_\delta}. \quad (1.117)$$

Считая, что ось поля совпадает с осью фазы, найдем потокосцепление фазы

$$\Psi_{Am} = \omega k_{o61} \Phi_{1m} = \frac{2}{\pi} \tau l_\delta \omega k_{o61} B_{1m}, \quad (1.118)$$

где Φ_{1m} — поток 1-й гармоники; B_{1m} — индукция 1-й гармоники в воздушном зазоре машины.

Тогда главная индуктивность фазы

$$L_A = \frac{\Psi_{Am}}{\sqrt{2}I} = \frac{4\mu_0}{p\pi^2} (\omega k_{o61})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}. \quad (1.119)$$

Для многофазной обмотки взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора

$$L_{12} = \frac{m}{2} L_A = \frac{2m\mu_0}{p\pi^2} (w_1 k_{o61})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}. \quad (1.120)$$

Для трехфазной машины

$$L_{12} = \frac{3}{2} L_A = \frac{6\mu_0}{p\pi^2} (w_1 k_{o61})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta}. \quad (1.121)$$

При расчете параметров электрических машин необходимо помнить, для какой модели определяются коэффициенты в уравнениях. В уравнениях машины с постоянными коэффициентами, которые были получены после ряда преобразований, параметры постоянные. Уравнения для установившегося режима, для которых строятся векторные диаграммы и схемы замещения, имеют постоянные коэффициенты.

При вращении поля в воздушном зазоре и перемещении обмоток реальной машины взаимные индуктивности между обмотками фаз статора и ротора изменяются по гармоническому закону, так как изменяется расположение обмоток относительно друг друга. При этом в уравнениях для непрерывной системы координат взаимная индуктивность между фазами будет

$$L_{BA} = \frac{\Psi_{BAm}}{\sqrt{2}I} = \frac{\Psi_{Am}}{\sqrt{2}I} \cos \alpha = L \cos \alpha. \quad (1.122)$$

Для трехфазной обмотки угол между фазами обмоток равен $2\pi/3$ и $4\pi/3$, поэтому амплитудные значения индуктивностей

$$L_{BA} = L_{CA} = \frac{L_A}{2}. \quad (1.123)$$

Как уже отмечалось, поле рассеяния обмотки принято делить на три части — на поле рассеяния пазовой части, лобовой части обмотки и рассеяние за счет высших гармоник (см. параграф 1.7). Индуктивность рассеяния обмоток определяют по формуле

$$L_\sigma = 2\mu_0 w^2 \frac{l_\sigma}{pq} \lambda_\sigma, \quad (1.124)$$

где $\lambda_\sigma = \lambda_\pi + \lambda_\lambda + \lambda_\delta$ — соответственно коэффициенты проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния для обмотки статора или ротора.

При определении коэффициента магнитной проводимости паза по закону полного тока, принимая для стали $\mu_c = \infty$,

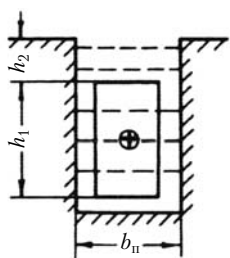


Рис. 1.86. Поле пазового рассеяния открытого прямоугольного паза

Для открытого паза с прямоугольными стенками (рис. 1.86)

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1}{3b_{\text{п}}} + \frac{h_2}{b_{\text{п}}}. \quad (1.126)$$

Направление силовых линий искажается при усложнении формы паза. Параллельность силовых линий особенно искажается вблизи воздушного зазора (см. рис. 1.43). Эффект изменения рассеяния в этой части паза учитывается добавочной составляющей рассеяния, которую называют рассеянием по коронкам зубцов.

Пазовое рассеяние тем больше, чем выше пазы, а ширина их меньше. Пазовое рассеяние в сильной степени определяется степенью раскрытия паза.

Поле лобовых частей имеет сложный вид из-за того, что в лобовых частях секции обмоток, принадлежащих разным фазам, переплетаются и на поле рассеяния лобовых частей обмоток оказывают влияние стальные части машины (магнитопровод, подшипниковые щиты, станина).

Коэффициенты $\lambda_{\text{п}}$ и $\lambda_{\text{л}}$ обычно рассчитываются при достаточно больших допущениях, и в расчетных формулах часто используются полуэмпирические коэффициенты. Расчетные формулы для $\lambda_{\text{п}}$ и $\lambda_{\text{л}}$ для различных пазов и обмоток приводятся в книгах по проектированию электрических машин [11].

Проводимость дифференциального рассеяния определяется наличием полей высших гармоник в воздушном зазоре. Чем больше кривая поля в зазоре отличается от синусоиды, тем больше дифференциальное рассеяние.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния рассчитывается по формуле

рассчитываем индукцию поля рассеяния, а затем потоки рассеяния поттокосцепления с проводниками катушки. Поттокосцепление пазового рассеяния для катушки с числом витков $w_{\text{к}}$, обтекаемой током $i_{\text{к}}$, может быть определено из соотношения

$$\Psi_{\text{п}} = \mu_0 w_{\text{к}}^2 i_{\text{к}} l_{\text{с}} \lambda_{\text{п}}, \quad (1.125)$$

где $\lambda_{\text{п}}$ — коэффициент магнитной проводимости рассеяния паза, безразмерная величина.

$$\lambda_d = \frac{t_z}{12\delta k_\delta} \xi, \quad (1.127)$$

где t_z — зубцовое деление; ξ — коэффициент, зависящий от выполнения обмотки, степени раскрытия пазов и влияния вихревых токов, для различных типов машин лежит в пределах 0,4—1.

В асинхронных машинах пазовое, лобовое и дифференциальное рассеяния имеют примерно одинаковую величину. В крупных синхронных машинах дифференциальное рассеяние обычно меньше пазового.

Сумма взаимной индуктивности и индуктивности рассеяния определяет полную индуктивность $L = L_{11} + L_\sigma$. Часто L_{11} обозначают как M , а индуктивность рассеяния L_σ и $L = M + L_\sigma$ соответственно с индексом «1» для первичной и индексом «2» для вторичной обмоток.

Зная индуктивности обмоток, определяют индуктивные сопротивления обмоток: $x = \omega L$ — полное индуктивное сопротивление обмотки, $x_{12} = \omega M$ — сопротивление взаимной индукции и $x = \omega L_\sigma$ — индуктивное сопротивление рассеяния.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции между обмотками статора и ротора

$$\begin{aligned} x_{12} = \omega_1 L_{12} &= 2\pi f_1 \frac{2m_1 \mu_0}{p\pi^2} (\omega_1 k_{o61})^2 \frac{\tau l_\delta}{\delta k_\delta} = \\ &= \frac{4m_1 f_1}{\pi} \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{k_\delta \delta} \frac{\omega_1^2 k_{o61}^2}{p}. \end{aligned} \quad (1.128)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$x_{\sigma 1} = \omega_1 L_{\sigma 1} = 2\pi f_1 2\mu_0 w_1^2 \frac{l_\delta}{pq} \lambda_\sigma = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{w_1^2}{pq} l_\delta \lambda_\sigma. \quad (1.129)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки

$$x_{\sigma 2} = \omega_2 L_{\sigma 2} = 2\pi f L_{\sigma 2}. \quad (1.130)$$

Обычно индуктивные сопротивления рассеяния обмоток имеют значение от нескольких процентов до 10—15% сопротивления взаимной индукции. Однако в микромашинах и специальных машинах сопротивления рассеяния могут быть больше этих значений.

При изменении режимов работы, а также в переходных режимах — при пуске, реверсе, повторном включении — ак-

тивные и индуктивные сопротивления изменяются из-за вытеснения тока в токопроводящих частях и насыщения магнитной системы. Поэтому при исследовании электрических машин рассматривают переходные и установившиеся параметры электрических машин.

Сопротивление взаимной индукции в большей степени зависит от насыщения, чем сопротивление рассеяния, так как поток рассеяния в основном замыкается по воздуху. Однако при коротких замыканиях, когда токи увеличиваются в 10–15 раз, пути потоков рассеяния насыщаются и индуктивное сопротивление рассеяния изменяется.

Расчет и опытное определение параметров электрических машин в динамических режимах осложняются наличием контуров в электрических машинах, которые нельзя разомкнуть (демпферные обмотки, контуры вихревых токов), наличием нескольких обмоток и насыщением. Переходные параметры определяются по результирующим кривым токов.

Момент инерции J является мерой инертности тела и во многом определяет динамические свойства машины. Момент инерции ротора электрической машины равен сумме произведений масс всех его точек на квадраты их расстояний от оси вращения:

$$J_p = \int_V \gamma \rho^2 dV, \quad (1.131)$$

где ρ — расстояние до оси вращения; dV — элемент объема; γ — плотность вещества ротора.

Для расчета момента инерции ротор делят на несколько частей, имеющих простую форму и состоящих из одного и того же материала, и определяют для них момент инерции. Общий момент инерции ротора определяется суммой моментов инерции отдельных частей.

При одной и той же массе момент инерции тела с меньшим радиусом меньше, чем при большем радиусе. Поэтому двигатели, работающие в переходных режимах, стремятся делать с малым диаметром ротора и большей длиной. Если требуется при пульсирующей нагрузке получить более равномерную скорость, проектируют двигатель с большим моментом инерции, выбирая ротор с большим диаметром и меньшей длиной. Большой момент инерции в гидрогенераторах улучшает их устойчивость при параллельной работе с сетью.

Точность решения уравнений электромеханического преобразования энергии зависит не только от того, как со-

ставлены уравнения, но и от точности определения параметров, входящих в эти уравнения. Поэтому определению параметров в теории электрических машин уделяется большое внимание.

1.16. Система относительных единиц

Система относительных единиц широко используется в теории электрических машин. В этой системе напряжения, токи, мощности и параметры выражаются в долях базисных значений этих величин. В качестве базисных значений принимаются номинальные значения тока, напряжения, мощности, частоты вращения, сопротивления, а также момента инерции, параметров и других показателей. Относительные величины обозначаются звездочкой.

Относительный ток

$$I_* = \frac{I}{I_{\text{НОМ}}}. \quad (1.132)$$

Относительное напряжение

$$U_* = \frac{U}{U_{\text{НОМ}}}. \quad (1.133)$$

Относительная мощность

$$P_* = \frac{P}{P_{\text{НОМ}}} = \frac{mUI}{mU_{\text{НОМ}}I_{\text{НОМ}}} = U_*I_*. \quad (1.134)$$

Относительные угловая скорость и частота вращения

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{2\pi n}{2\pi n_{\text{НОМ}}} = \frac{n}{n_{\text{НОМ}}} = n_*. \quad (1.135)$$

Относительный момент вращения

$$M_* = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{M\omega_{\text{НОМ}}}{P_{\text{НОМ}}}. \quad (1.136)$$

В качестве базисного или номинального значения сопротивления принимается

$$z_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}}. \quad (1.137)$$

Относительные значения r , x , z

$$r_* = \frac{r}{z_{\text{НОМ}}}; \quad x_* = \frac{x}{z_{\text{НОМ}}}; \quad z_* = \frac{z}{z_{\text{НОМ}}}. \quad (1.138)$$

Относительные значения индуктивности

$$L_* = \frac{L}{L_{\text{ном}}} = \omega_1 \frac{L}{z_{\text{ном}}}. \quad (1.139)$$

Все уравнения электрических машин могут быть записаны в относительных единицах. В относительных единицах удобно выражать параметры, строить векторные и круговые диаграммы, схемы замещения и решать уравнения на ЭВМ. Для одного и того же типа электрических машин параметры в относительных единицах характеризуют геометрию машины — ее размеры, воздушный зазор и насыщение магнитной системы.

При моделировании уравнений электрических машин на ЭВМ для изменения масштаба времени используется базовое (относительное) время

$$t_0 = \frac{1}{\omega_0}, \quad (1.140)$$

где ω_0 — базовая угловая скорость, $\omega_0 = \omega_0 = 2\pi f_0$.

Правильный выбор масштабов переменных и применение относительных единиц расширяют возможности ЭВМ.

1.17. Потери и коэффициент полезного действия

В электрических машинах преобразование энергии из электрической в механическую и обратно сопровождается преобразованием электрической или механической энергии в тепло. Энергию, преобразующуюся в электрических машинах и трансформаторах в тепло, принято называть потерями.

Потери в электрических машинах делят на основные и добавочные. К основным потерям относят электрические, магнитные и механические.

Электрические потери, или, как их еще называют, потери в меди, включают в себя потери в обмотках и потери в щеточных контактах (если в машине есть скользящие контакты):

$$P_{\text{э}} = mI^2 r_0, \quad (1.141)$$

где I — ток в фазе; r_0 — активное сопротивление фазы обмотки при расчетной температуре.

Так же рассчитываются электрические потери в обмотках машин постоянного тока. При этом число фаз принимается равным единице.

Электрические потери в скользящем контакте зависят от сорта щеток и состояния контактных поверхностей. Так как сопротивление щеточного контакта зависит нелинейно от тока, потери определяются по формуле

$$P_{\text{э.щ}} = m \Delta U_{\text{щ}} I, \quad (1.142)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в скользящем контакте.

Для угольных и графитных щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 1$ В; для металлографитных и металлоугольных щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 0,3$ В [11].

Магнитные потери, или потери в стали, включают потери в зубцах, ярмах магнитопровода и полюсах машины, т.е. в основных участках магнитной системы, где замыкается переменный рабочий поток машины. Магнитные потери состоят из потерь на вихревые токи и потерь на гистерезис. Магнитные потери зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, индукции и частоты перемагничивания. Значительное влияние на магнитные потери оказывают технологические факторы (штамповка листов, прессовка пакетов, механическая обработка магнитопровода).

При определении магнитных потерь пользуются приближенной формулой

$$P_{\text{м}} \approx k_{\text{обр}} p_{\text{уд}} (f/50)^{\beta} B_i^2 G_i \quad (1.143)$$

где $k_{\text{обр}}$ — коэффициент обработки, зависящий от обработки стали (для асинхронных двигателей, например, 1,4—1,8); $p_{\text{уд}}$ — удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг; f — частота перемагничивания, Гц; β — показатель степени, зависящий от марки стали; B_i — индукция в соответствующей части магнитопровода, Тл; G_i — масса части магнитопровода, где индукция магнитного потока B_i .

В табл. 1.4 приведены значения удельных потерь при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц и коэффициента β для различных марок стали при толщине листа 0,5 мм.

Во вращающихся машинах и трансформаторах процессы перемагничивания стали различны. В трансформаторах имеет место пульсационное перемагничивание, когда неподвижный магнитопровод перемагничивается переменным напряжением. При вращении якоря машины постоянного тока относительно полюсов и при перемагничивании участков магнитопровода во вращающемся магнитном поле имеет место вращательное перемагничивание.

Таблица 1.4

Марка стали	$P_{уд}$, Вт/кг	β
2013, 2011, 2211	2,5–2,6	1,5
2312	1,75	1,4
2411	1,6	1,3

При небольших индукциях потери на гистерезис при вращательном перемагничивании меньше потерь на гистерезис, при пульсационном перемагничивании (они могут отличаться

в 2 раза). Однако при индукциях 1,5–1,7 Тл потери в стали при обоих видах перемагничивания становятся примерно одинаковыми.

Рассматривая отдельные участки магнитной системы при вращательном перемагничивании, следует отметить, что существуют участки, где есть радиальная и тангенциальная составляющие индукции, и можно представлять перемагничивание как эллиптическое перемагничивание [17]. Эллиптическое перемагничивание называют смешанным, так как его можно представить как наложение вращательного и пульсационного перемагничиваний.

При проектировании электрических машин пользуются таблицами удельных потерь, полученных на аппарате Эпштейна при пульсационном перемагничивании 1 кг массы листовой стали при частоте 50 Гц и индукции 1 Тл. Удельные потери для различных марок стали приведены в работах [11, 17].

Из-за наличия в формулах для определения потерь в стали значительных эмпирических коэффициентов, учитывающих обработку стали, уточнение удельных потерь в зависимости от характера перемагничивания отдельных участков магниопровода имеет смысл лишь в особых случаях.

Механические потери включают в себя потери на трение вращающихся частей машины о воздух, потери на трение в подшипниках и в скользящих контактах, а также потери в вентиляторе, затрачиваемые на создание потока охлаждающего воздуха или другого охлаждающего агента.

При проектировании электрических машин каждая составляющая механических потерь рассчитывается отдельно. Приближенно можно считать, что механические потери пропорциональны квадрату частоты вращения.

Потери на трение зависят от плотности и вязкости среды, в которой вращается ротор машины. При заполнении машины водородом механические потери уменьшаются примерно в 10 раз по сравнению с потерями в воздухе. Механические потери растут, если ротор вращается в жидкости.

Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в асинхронных двигателях с радиальной системой вентиляции рассчитываются по формуле

$$P_{\text{мех}} \approx k_{\text{тр}}(n/1000)^2(10D_a)^3, \quad (1.144)$$

где $k_{\text{тр}} = 5$ при $2p = 2$; $k_{\text{тр}} = 6$ при $2p > 4$; D_a — диаметр ротора, м. Потери на трение щеток о контактные кольца

$$P_{\text{тр.щ}} = k_{\text{тр.щ}} \rho_{\text{щ}} S_{\text{щ}} v_{\text{к}}, \quad (1.145)$$

где $k_{\text{тр.щ}}$ — коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,1—0,2); ρ — давление на контактной поверхности щеток, Па; $S_{\text{щ}}$ — площадь контактной поверхности щеток, м²; $v_{\text{к}}$ — линейная скорость поверхности контактных колец, м/с.

Потери на охлаждение машины (вентиляционные потери) определяются мощностью, которая расходуется на циркуляцию теплоносителя в машине. Она зависит от количества воздуха, водорода или жидкости, отводящих тепло из машины, и от КПД вентиляторов или насосов.

Добавочные потери делят на добавочные потери при холостом ходе и при нагрузке. К добавочным потерям при холостом ходе относятся поверхностные и пульсационные потери.

Поверхностные потери возникают в поверхностном слое зубцов или полюсов из-за пульсаций поля в воздушном зазоре. Частота пульсаций индукции определяется числом зубцов и частотой вращения $f_z = nz/60$, где z — число зубцов на статоре, если определяются поверхностные потери в роторе, или число пазов на роторе, если определяются поверхностные потери в статоре.

Пульсационные потери — это потери в стали за счет пульсаций потока в зубцах статора или ротора. Они зависят от индукции в зубцах и частоты пульсаций, которая в зубцах статора определяется числом зубцов ротора, а частота пульсаций в зубцах ротора определяется числом зубцов статора.

Добавочные потери при нагрузке возникают в обмотках и магнитопроводе из-за потоков рассеяния и искажения поля в воздушном зазоре при нагрузке.

Расчет добавочных потерь производится для крупных электрических машин. Для машин общепромышленных серий добавочные потери принимаются равными 0,5—1% номинальной мощности [11].

Коэффициент полезного действия электрических машин:
генераторов

$$\eta = 100 \left[1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P} \right]; \quad (1.146)$$

двигателей

$$\eta = 100 \left[1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \right]. \quad (1.147)$$

где P_1 — мощность, подводимая к двигателю; P_2 — полезная мощность, отдаваемая генератором; ΣP — сумма потерь в машине.

На рис. 1.87 дана зависимость КПД от полезной мощности P_2 , выраженной в относительных единицах. Зависимость $\eta = f(P_2)$ при напряжении сети $U_c = \text{const}$ объясняется тем, что с ростом нагрузки полезная мощность растет пропорционально току, а потери электрические растут пропорционально квадрату тока. Коэффициент полезного действия имеет максимум, когда постоянные потери равны потерям переменным. К постоянным потерям относятся потери, не зависящие от нагрузки. Это потери магнитные и механические (для машин, у которых частота вращения не зависит или мало зависит от нагрузки). Переменные потери — это электрические потери, которые пропорциональны квадрату тока нагрузки.

При расчете электрических машин максимум КПД стремятся получить при 0,6–0,8 номинальной нагрузки, так как электрические машины длительно работают с недогрузкой 15–25%. Чтобы сдвинуть максимум КПД в область номинальной нагрузки или в область перегрузок, надо увеличить сечение обмотки и снизить электрические потери в машине.

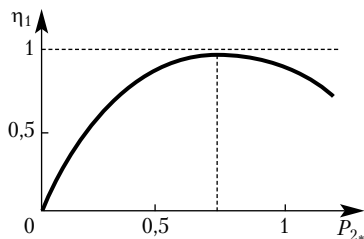


Рис. 1.87. Зависимость КПД от нагрузки

Коэффициент полезного действия зависит от мощности машины. В турбогенераторе мощностью 800 МВт $\eta = 98,8\%$. Однако в микромашинах КПД может быть 10–20%. В трансформаторах предельной мощности $\eta = 99,7\%$. Таких высоких КПД не имеют другие преобразователи энергии.

1.18. Нагрев и охлаждение электрических машин

Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах сопровождается выделением тепла в активных частях машины. Если тепло не будет отводиться от машины, то температура изоляции быстро достигает допустимой для данного класса изоляции и дальнейшая работа электрической машины приведет к ускоренному старению изоляции и сокращению срока службы. Для отвода тепла из машины предусматривается система охлаждения.

Системы охлаждения электрических машин весьма разнообразны (рис. 1.88). Различают машины с *естественным* и *искусственным охлаждением*. В зависимости от того, какое вещество применяется в качестве охлаждающего агента, машины делятся на машины с *воздушным, водородным, масляным и водяным* охлаждением. В зависимости от способа охлаждения различают машины с *косвенным* охлаждением, когда газ или жидкость непосредственно не соприкасается с проводником, и машины с *непосредственным внутренним* охлаждением, когда газ или жидкость проходит внутри проводников.

В специальных машинах применяется испарительная система охлаждения, когда жидкость испаряется с тепловыделяющих поверхностей машины.

От правильного выбора системы охлаждения зависят габариты и масса машины. За последние 40 лет удалось практически в тех же габаритах в результате перехода с воздушного на внутреннее водяное охлаждение повысить мощность турбогенераторов в 10 раз. Это одно из выдающихся технических достижений XX в. Снижение массы на единицу мощности имело место и в электрических машинах других типов.

На рис. 1.88, *а* показана схема вентиляции закрытой обдуваемой машины с самовентиляцией. Вентилятор 1 укреплен на валу машины. На рис. 1.88, *б* представлена схема продуваемой машины с самовентиляцией. Лопатками вентилятора являются приливы на короткозамыкающих кольцах ротора 1. На рис. 1.88, *в* дана схема машины с разомкнутой нагнетательной независимой системой вентиляции с забором воздуха и выбросом его по трубопроводу 2. Забор воздуха из окружающего пространства осуществляется вентилятором, который вращается двигателем, специально предназначенным осуществлять движение воздуха внутри машины или снаружи ее. Машина с замкнутой независимой

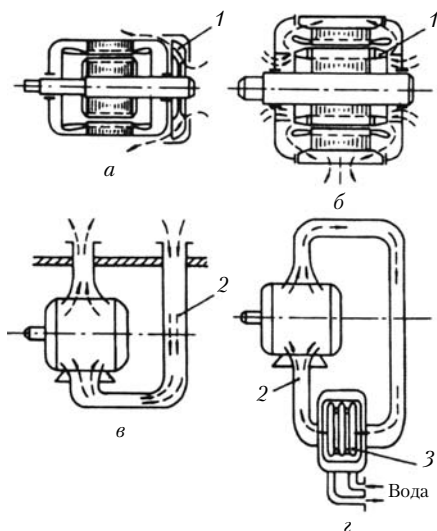


Рис. 1.88. Системы охлаждения электрических машин

системой вентиляции показана на рис. 1.88, а. Здесь воздух или водород охлаждается в газоохладителе 3. Обычно в газоохладитель подается водопроводная вода, циркулирующая по трубкам газоохладителя, и таким образом происходит охлаждение воздуха или водорода.

На рис. 1.88 показаны лишь основные системы охлаждения. В соответствующих главах книги будут рассмотрены подробнее вопросы нагрева и охлажде-

ния трансформаторов, синхронных машин и других машин.

Процесс передачи тепла от различных частей машины в окружающую среду подчиняется законам теплообмена — учения о самопроизвольных необратимых процессах распространения тепла в пространстве.

Под процессом распространения тепла понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами, областями рассматриваемой среды. Перенос тепла осуществляется тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводностью называется перенос тепла при непосредственном соприкосновении тел или частей тела с различной температурой.

Явление *конвекции* наблюдается в движущихся жидкостях и газах. Перенос тепла при этом осуществляется за счет перемещения макрообъемов среды в пространстве.

Тепловым излучением называется явление переноса тепла в виде электромагнитных волн с двойным взаимным превращением энергии — тепловой энергии в энергию излучения и обратно.

В действительности элементарные виды теплообмена в чистом виде встречаются редко. Как правило, один вид теплообмена сопровождается другим. Так, конвекция тепла

всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс переноса тепла конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом.

Часто встречается случай конвективного теплообмена между потоком охлаждающей среды и поверхностью твердого тела. Этот процесс называют конвективной теплоотдачей.

Случай теплообмена между различными средами, разделенными твердой стенкой, принято называть теплопередачей.

В основе описания процесса теплопроводности лежит так называемый закон Фурье, согласно которому количество переданного тепла пропорционально падению температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению распространения тепла:

$$\vec{q} = -\lambda \operatorname{grad} t, \quad (1.148)$$

где \vec{q} — вектор плотности теплового потока, Вт/м²; $\operatorname{grad} t$ — градиент температуры; λ — коэффициент теплопроводности.

Знак «−» отражает то обстоятельство, что тепло всегда распространяется в сторону убывания температуры.

Полное количество тепла Q , переданного через поверхность F за время τ ,

$$Q = - \int_0^\tau \int_F \lambda \operatorname{grad} t \, dF dt. \quad (1.149)$$

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С), является физическим параметром вещества и характеризует его способность проводить тепло. Различные вещества имеют различные коэффициенты теплопроводности. Как правило, металлы хорошо проводят тепло, значения их коэффициентов теплопроводности много больше значений коэффициентов теплопроводности электрических изоляторов. В табл. 1.5 приведены коэффициенты теплопроводности ряда используемых в электромашиностроении материалов.

Процесс теплообмена между поверхностью тела и средой относится к сложным физическим процессам и зависит от большого количества факторов. Для его описания используется эмпирический закон Ньютона — Рихмана, согласно которому плотность теплового потока на поверхности тела пропорциональна разности температур поверхности и хладагента:

$$q = \alpha(t_c - t_m), \quad (1.150)$$

Таблица 1.5

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°C)
Серебро	420
Медь	380
Алюминий	220
Электротехническая сталь (вдоль слоя)	48—20
Электротехническая сталь (поперек слоя)	3,1—1,2
Стекло	1,1
Миканит	0,2
Лакоткань	0,15
Изоляция пазовая	0,1
Вода при 40°C	0,633
Водород при 40°C	0,19
Трансформаторное масло при 40°C	0,164

где t_c — температура поверхности тела; t_m — температура хладагента (жидкости или газа); α — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м²·°C).

Процесс теплоотдачи в основном определяется условиями движения среды. Можно выделить два режима течения — ламинарный и турбулентный. При *ламинарном* режиме течение имеет спокойный, струйчатый характер, при *турбулентном* движение неупорядоченное, вихревое. Изменение режима течения происходит при некоторой критической скорости, конкретной для каждого случая.

Режим течения определяется не только скоростью, но и особым безразмерным комплексом, называемым числом Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{vl}{\nu}, \quad (1.151)$$

где v — скорость движения хладагента; ν — кинематический коэффициент вязкости хладагента; l — характерный размер обтекаемого тела или канала, в котором движется хладагент.

По природе возникновения различают два вида движения хладагента — свободное и вынужденное. *Свободным* на-

зывается движение, происходящее вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкостей или газов в гравитационном поле. Свободное движение называют также естественной конвекцией. *Вынужденным* называется движение, возникающее под действием внешних источников, например вентилятора, насоса и пр. Наряду с вынужденным движением может существовать и развиваться свободное. Его роль возрастает с ростом разности температур в отдельных точках охлаждающей среды и с уменьшением скорости вынужденного движения.

Дифференциальное уравнение теплопроводности, связывающее временные и пространственные изменения температуры в любой точке тела при передаче тепла теплопроводностью, можно представить в виде

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (1.152)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа в декартовой системе координат; q_v — плотность теплового потока внутренних источников тепла (предполагается равномерно распределенным и постоянным во времени), Вт/м³; c — теплоемкость тела, Дж/м³; ρ — плотность тела, кг/м³; $\alpha = \lambda/c\rho$ — коэффициент температуропроводности, физический параметр тела, иногда называемый коэффициентом термической диффузии, м²/с; этот коэффициент характеризует скорость изменения температуры в теле.

Если тело не содержит внутренних источников тепла, уравнение (1.152) приобретает вид уравнения Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t. \quad (1.153)$$

Если имеются внутренние источники тепла, то процесс стационарен (температура во времени не меняется) и уравнение (1.153) превращается в уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 t + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (1.154)$$

Наконец, для стационарной теплопроводности и отсутствия внутренних источников тепла выражение (1.154) принимает вид уравнения Лапласа:

$$\nabla^2 t = 0. \quad (1.155)$$

Для того чтобы найти частные решения уравнений (1.152)—(1.155), соответствующие конкретным случаям, необходимо сформулировать условия однозначности.

Эти условия включают в себя геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, физические условия, определяемые значениями внутренних источников тепла, начальные условия — закон распределения температуры в начальный момент времени — и, наконец, граничные условия. Последние могут быть заданы несколькими способами. Наиболее типичными являются способ, при котором задается распределение температуры на поверхности тела для каждого момента времени (граничные условия первого рода), и способ, при котором задается температура хладагента t_m , а также закон теплообмена между поверхностью тела и средой (граничные условия третьего рода). Форма записи граничных условий третьего рода может быть получена из уравнений (1.152) и (1.155):

$$\left[\frac{\partial t}{\partial n} \right]_c = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_c - t_m), \quad (1.156)$$

где $\left[\frac{\partial t}{\partial n} \right]_c$ — градиент температуры на поверхности тела.

В установившихся в тепловом отношении режимах количество тепла, выделяющегося в объеме тела или поступающего извне, равно количеству тепла, отдаваемого телом во внешнюю среду. Внутренняя энергия тела остается неизменной, и температура в любой точке тела не меняется во времени. В стационарном режиме тело находится в тепловом равновесии с охлаждающей средой.

Для случая стационарного режима при отсутствии внутренних источников тепла в плоском теле решение уравнения (1.156) приводит к линейному распределению температуры по толщине тела. Количество тепла, переданного через тело в единицу времени:

для граничных условий первого рода

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})F; \quad (1.157)$$

для граничных условий третьего рода, при которых заданы температура среды t_m и коэффициент теплоотдачи от поверхности тела α ,

$$Q = k(t_{c1} - t_m)F, \quad (1.158)$$

здесь k — коэффициент теплопередачи, характеризующий эффективность совместной передачи тепла через тело теплопроводностью и от тела к среде конвекцией:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}}. \quad (1.159)$$

Уравнения (1.157) и (1.158) по форме аналогичны уравнениям закона Ома для электрической цепи. Можно записать их в виде

$$Q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_\lambda} F; \quad (1.160)$$

$$Q = \frac{t_{c1} - t_m}{R} F, \quad (1.161)$$

где $R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda}$ — термическое сопротивление теплопроводности тела, а $R = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} = R_\lambda + R_\alpha$ — термическое сопротивление теплопередачи через тело, состоящее из термического сопротивления теплопроводности R_λ и термического сопротивления теплоотдачи $R_\alpha = \frac{1}{\alpha}$.

Распределение температуры в телах цилиндрической формы описывается логарифмической кривой (рис. 1.89), и количество тепла, переданного через цилиндрическую стенку на единицу ее длины, может быть найдено при учете $F = 2\pi r l$ (l — длина тела) из выражения

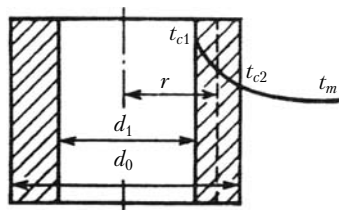


Рис. 1.89. Распределение температуры в полем цилиндре

$$Q_l = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} (t_{c1} - t_{c2}), \quad (1.162)$$

или для граничных условий третьего рода

$$Q_l = k_l \pi (t_{c1} - t_m), \quad (1.163)$$

где

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha d_2}} \quad (1.164)$$

— линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·°С).

Величина, обратная линейному коэффициенту теплопередачи, называется линейным термическим сопротивлением теплопередачи:

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha d_2} = R_{l\lambda} + R_{l\alpha}. \quad (1.165)$$

Составляющие полного термического сопротивления представляют собой термическое сопротивление теплопроводности через цилиндрическую стенку $R_{l\lambda}$ и термическое сопротивление теплоотдачи от цилиндрической стенки $R_{l\alpha}$.

На практике часто встречаются цилиндры, толщина стенок которых мала по сравнению с диаметром. В этом случае можно рассчитывать термические сопротивления как для плоского тела. При $\frac{d_2}{d_1} < 2$ погрешность не превышает 4%.

При наличии внутренних тепловых источников с плотностью теплового потока q_v решение уравнений теплопроводности приводят к нелинейному (параболическому) распределению температуры по толщине плоского тела.

В расчетах часто бывает более удобным вместо тела, в котором внутренние источники тепла рассредоточены по объему, рассматривать некоторое эквивалентное тело, в котором все тепло выделяется на одной из его поверхностей, а изменение температуры происходит по линейному закону. При этом при равенстве тепловых потоков в реальном и эквивалентном телах необходимо выбрать параметры эквивалентного тела таким образом, чтобы максимальное или среднее значение его температуры было равным соответствующему значению реального тела.

Для плоского тела толщиной δ при равенстве максимальных температур толщина эквивалентного тела $\delta_{\text{экв}} = \frac{\delta}{2}$, а при равенстве средних температур $\delta_{\text{экв}} = \frac{\delta}{3}$.

В неустановившихся режимах отсутствует тепловое равновесие между телом и окружающей средой, температура в точках тела и его внутренняя энергия меняются во времени. Такие режимы принято называть нестационарными. Нестационарность тепловых процессов всегда связана с явлениями нагрева или охлаждения тела. На рис. 1.90, а представлена зависимость температуры тела от времени

$$\Theta = \Theta_{\text{уст}}(1 - e^{-t/T}), \quad (1.166)$$

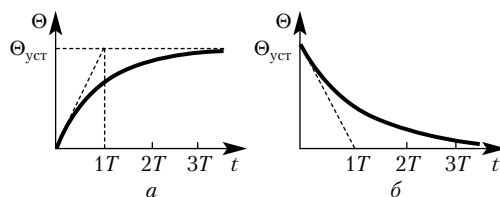


Рис. 1.90. Кривая нагрева тела (а) и охлаждения (б)

где $\Theta_{уст}$ — установившаяся температура; T — постоянная времени нагревания тела.

Кривая охлаждения тела дана на рис. 1.90, б.

Изменение температуры во времени рассчитывается в электрических машинах, предназначенных для кратковременных и повторно-кратковременных режимов работы. В машинах, предназначенных для длительного режима, рассчитываются установившиеся температуры. Установившиеся температуры обычно рассчитываются по схеме тепловых цепей машины, состоящей из источников тепла и термических сопротивлений, по которым как бы передаются тепловые потоки от нагретых частей машины к охлаждающей среде.

Тепловые схемы электрической машины составляются по аналогии с электрическими схемами. Температура в тепловых схемах играет роль напряжения в электрических схемах, а термическое сопротивление играет роль активного сопротивления. Обычно тепловая схема состоит из нескольких источников и сопротивлений.

На рис. 1.91 приведена упрощенная тепловая схема замещения статора машины переменного тока. В основу схемы легло условие, согласно которому источниками тепла являются однородные в тепловом отношении части машины: обмотка и стальной сердечник статора. Мощности источников тепла в них равны электрическим потерям в обмотке $P_{об}$ и потерям в стали $P_{ст}$.

Тепловые потоки направлены: от обмотки к стали сердечника $Q_{ст}$ через термическое сопротивление пазовой изоляции $R_{из}$; от обмотки к охлаждающей среде через термическое сопротивление изоляции обмотки

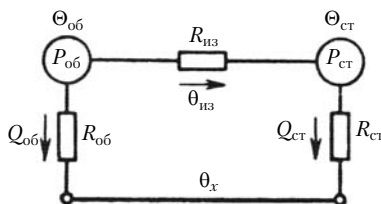


Рис. 1.91. Упрощенная тепловая схема замещения статора машин переменного тока

и сопротивление теплоотдачи от поверхности обмотки $R_{об}$; от поверхности стального сердечника в окружающую среду $Q_{ст}$ через термическое сопротивление $R_{ст}$.

Зная потери и значения термических сопротивлений, трудно определить значения тепловых потоков и средних температур частей статора $\Theta_{об}$ и $\Theta_{ст}$, равных соответствующим превышениям температур, если принять температуру окружающей среды $\Theta_x = 0$ (см. рис. 1.91).

Очевидно, что чем большее число конструктивных частей машины может быть выделено в качестве однородных в тепловом отношении тел и заменено эквивалентными элементами тепловой схемы замещения, тем точнее окажутся результаты расчета.

Чтобы отвести тепло из машины, необходимо определить расход охлаждающей среды Q . При гидравлическом расчете определяются напор и скорость охлаждающей среды в отдельных каналах, где проходит охлаждающая среда. Далее рассчитываются напорные элементы вентиляторов или насосов, обеспечивающих необходимый расход, и скорости охлаждающей среды, а также мощность, необходимая для работы вентилятора или другого напорного устройства, обеспечивающего циркуляцию охлаждающей среды.

Система вентиляции во многом определяется свойствами охлаждающей среды — объемной удельной теплоемкостью c_v и плотностью γ . В табл. 1.6 приведены значения c_v и γ веществ, используемых в электромашиностроении в качестве охлаждающих агентов.

Таблица 1.6

Охлаждающий агент	c_v , Дж/(м ³ ·°С)	γ , кг/м ³
Воздух (0°С, 10 ⁵ Па)	1,1·10 ³	1,3
Водород (0°С, 10 ⁵ Па)	1,1·10 ³	0,09
Трансформаторное масло при 15°С	1,5·10 ⁶	850
Вода при 15°С	4,1·10 ⁶	999

1.19. Материалы, применяемые в электромашиностроении

В электрических машинах энергия магнитного поля сосредоточена в основном в воздушном зазоре. Чтобы сконцентрировать энергию в воздушном зазоре, необходимо иметь магнитопровод и обмотки, которые вместе с конст-

рукционными материалами обеспечивают распределение электромагнитных, тепловых и механических полей в машине.

Принято материалы, применяемые в электрических машинах, делить на активные и конструктивные. К *активным* относятся материалы обмоток и магнитопровода, а к *конструктивным* — изоляционные и материалы, из которых выполняются станины, щиты, валы и другие части электрической машины. Это деление условно, так как во многих машинах совмещены активные и конструктивные функции отдельных частей машины. Примером может служить машина постоянного тока, в которой магнитный поток замыкается по станине.

Для изготовления магнитопроводов электрических машин применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, чугун и магнитодиэлектрики.

Тонколистовая электротехническая сталь по ГОСТу 21427.2—83 разделяется на 38 марок и изготавливается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Обозначения марок стали состоят из четырех цифр. Первая обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки; вторая — содержание кремния; третья — группу по основной нормируемой характеристике. Три первые цифры в обозначении марки — тип стали, а четвертая — порядковый номер типа стали.

Сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на три класса: горячекатаную изотропную, холоднокатаную изотропную, холоднокатаную анизотропную с ребровой текстурой.

По содержанию кремния сталь подразделяют на шесть групп: 0 — с содержанием кремния до 0,4% включительно (нелегированная), 1 — с содержанием кремния от 0,4 до 0,8%, 2 — с содержанием кремния свыше 0,8 до 1,8% включительно, 3 — свыше 1,8 до 2,8% включительно, 4 — свыше 2,8 до 3,8%, 5 — свыше 3,8 до 4,8% включительно.

По основной нормируемой характеристике стали делятся на пять групп: 0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,7/50}$), 1 — удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,5/50}$), 2 — удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1,0/400}$), 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$), 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}).

Свойства стали зависят от содержания кремния и от условий изготовления. Сталь с низким содержанием кремния имеет меньшую магнитную проницаемость и большие магнитные потери, а также большое магнитное насыщение. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис и высокую магнитную проницаемость в слабых и средних полях. Присадка кремнием снижает плотность и повышает удельное сопротивление стали. Для стали с содержанием кремния 0,8–1,8% плотность $7,8 \text{ т/м}^3$, удельное сопротивление $0,25 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Для стали с содержанием кремния 3,8–4,8% плотность $7,55 \text{ т/м}^3$, удельное сопротивление $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

В электротехнической промышленности широко применяются анизотропные холоднокатаные стали, имеющие в направлении проката более высокую проницаемость и меньшие потери в слабых полях, чем горячекатаные стали. Выпускаются изотропные — холоднокатаные — стали с кубической текстурой, имеющие высокие магнитные качества как в направлении проката, так и в перпендикулярном прокатке направлении [17].

Горячекатаная изотропная тонколистовая электротехническая сталь изготавливается в виде листов по ГОСТу 21427.3—75 следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571 и 1572.

По точности прокатки, по толщине сталь подразделяют на сталь нормальной (Н) и повышенной (П) точности.

По неплоскостности сталь делится на классы 1 и 2. Листы должны быть плоскими. Неплоскостность не должна превышать: для листов класса 1 — 6 мм на 1 м длины, для листов класса 2 — 12 мм на 1 м длины.

На электротехнические заводы листы поставляются в термически обработанном состоянии. По состоянию поверхности сталь выпускается с травленой (Т) и с нетравленой (НТ) поверхностями. Поверхность листов должна быть гладкой, без следов коррозии, отслаивающейся окалины, налета порошкообразных веществ, препятствующих нанесению изоляции.

Пример условного обозначения листа толщиной 0,50 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности прокатки П, класса неплоскостности 2 с травленой поверхностью Т, из стали марки 1512: лист $0,50 \times 1000 \times 2000\text{-Г1-2-Т-1512}$ [17].

На электротехническую холоднокатаную анизотропную тонколистовую сталь, изготавливаемую в виде рулонов, листов и резаной ленты, распространяется ГОСТ 21427.1—83. Эта сталь выпускается следующих марок: 3411, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406.

По видам продукции холоднокатаная сталь подразделяется на лист, рулон, ленту резаную. По точности прокатки и неплоскостности она делится так же, как горячекатаная. По виду покрытия: с электроизоляционным нагревостойким покрытием ЭТ; с покрытием, не ухудшающим штампуемость, М (мягкое); без электроизоляционного покрытия БП; по коэффициенту заполнения стали с покрытием — на группы А и Б. Рулонную сталь изготавливают толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,50 мм и шириной 750, 860 и 1000 мм.

Резаную ленту изготавливают толщиной 0,28; 0,30; 0,35; 0,50 мм, шириной 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм. Предельные отклонения по толщине стали, по ширине рулонов и ленты, неплоскостность оговариваются ГОСТами. Сталь поставляется в термически обработанном состоянии. Сталь толщиной 0,28; 0,30 и 0,35 мм изготавливают с электроизоляционным нагревостойким покрытием, а сталь толщиной 0,50 мм — без электроизоляционного нагревостойкого покрытия или с покрытием, не ухудшающим штампуемость.

ГОСТ 21427.2—83 распространяется на тонколистовую холоднокатаную изотропную электротехническую сталь. Эта сталь, выпускаемая в виде рулонов, листов и резаной ленты, имеет следующие марки: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411 и 2412. По точности прокатки, по неплоскостности, по коэффициенту заполнения подразделения те же, что и у анизотропной стали. По типу покрытия эти стали выпускаются с нагревостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ), с нетермостойким (Э) и без покрытия (БП).

Изотропную рулонную сталь изготавливают толщиной 0,35; 0,50; 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм.

Магнитные свойства сталей приведены в пособиях по проектированию электрических машин [11, 17, 19].

Магнитодиэлектрики — материалы, имеющие высокие магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление, — находят применение для изготовления магнитопроводов.

Для уменьшения потерь от вихревых токов листы стали изолируются лаком или оксидируются. Уменьшение активного сечения пакетов за счет изоляции между листами учитывается при помощи коэффициента заполнения пакета сталью $k_{ст}$. Значение $k_{ст}$ зависит от толщины листов, рода изоляции между листами, а также от длины пакета и усилий при прессовке. Обычно $k_{ст} \approx 0,98 \div 0,88$.

Листовая сталь марки 1211 толщиной 0,5 или 1 мм применяется для изготовления главных полюсов машин постоянного тока. Для полюсов синхронных машин применяется сталь толщиной 1—2 мм и более. Это дает улучшение $k_{ст}$, который достигает 0,95—0,98.

Листовая сталь используется для сварных станин машин постоянного тока и изготовления ободов роторов синхронных машин. Толщина листовой стали колеблется от 1,5 до 120 мм. Магнитные свойства такие же, как и у литой стали. Кованые стали находят применение при изготовлении роторов синхронных машин и добавочных полюсов машин постоянного тока. Чугун в последнее время в электромашиностроении применяется все реже из-за плохих магнитных свойств.

К проводниковым материалам, применяемым в электромашиностроении, относятся медь и алюминий. Хотя серебро имеет на 4% меньшее удельное сопротивление по сравнению с медью, оно относится к дефицитным материалам и практически не применяется при изготовлении электрических машин.

Проводниковую медь получают из слитков путем гальванической очистки в электролитических ваннах. Даже ничтожное количество примесей резко снижает электрическую проводимость меди. Почти все изделия из меди для электротехнической промышленности изготавливаются путем проката, прессовки и волочения. Волочением получают провода диаметром до 0,005 мм, ленты толщиной до 0,1 мм и фольга толщиной до 0,008 мм. При механических деформациях медь подвергается наклепу, который устраняется при термообработке.

Для изготовления коллекторов машин постоянного тока применяется твердотянутая медь с присадкой кадмия. Кадмий увеличивает механическую прочность меди и благоприятно сказывается на качестве пленки на поверхности пластин, улучшая коммутацию.

Хорошая электрическая проводимость обеспечивает широкое применение алюминия в электротехнической промыш-

плотности. Важными свойствами алюминия являются его малая плотность, низкая температура плавления, высокая пластичность, прочная и очень тонкая пленка оксида, защищающая алюминий от коррозии. Алюминий хорошо обрабатывается давлением, и из него получают листы, проволока, тончайшая фольга и штампованные детали. Плотность алюминия в 3,3 раза ниже, чем меди, а удельное сопротивление лишь в 1,7 раза выше, чем меди. Сравнение свойств меди и алюминия дано в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Материал	Плотность, т/м ³	Удельное сопротив- ление при 20°С, 10 ⁻⁶ Ом·м	Температурный коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ °С ⁻¹	Тепло- проводность, Вт/(м·°С)
Медь (электро- техническая)	8,9	0,01724	16,42	375—380
Алюминий (технический)	2,6—2,7	0,028	24	205

Алюминиевые провода изготавливаются из алюминия марки АЕ, имеющего в своем составе 99,5% чистого алюминия и 0,5% примесей железа и кремния. Для литейных сплавов наиболее употребительны сплавы АЛ2 и АЛ9. Для заливки роторов асинхронных машин применяются сплавы АКЗ, АКМ, АКЦ с повышенным сопротивлением.

Сплавы меди с цинком называются латунями, а сплавы меди с оловом, кадмием, бериллием и фосфором — бронзами. Латуни и бронзы применяются для изготовления короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей и демпферных обмоток синхронных машин. Латунь и бронза хорошо обрабатываются, имеют малую усадку и применяются для изготовления токоведущих деталей сложной формы.

В целях экономии меди контактные кольца асинхронных машин с фазным ротором выполняются из стали. Из стали выполняются и роторы специальных асинхронных двигателей. Но двигатели с массивным ротором применяются редко. В этом случае имеет место совмещение магнитных и проводниковых функций материала. В настоящее время ведутся работы по внедрению стальных магнитных и немагнитных проводов.

Медные и алюминиевые обмоточные провода выпускаются круглых и прямоугольных сечений. Изоляция прово-

дов определяет принадлежность проводов к тому или иному классу нагревостойкости.

Круглые медные эмалированные провода широко применяются в электромашиностроении. Они имеют небольшую толщину изоляции — в 1,5–2,5 раза меньшую, чем у проводов с покрытием эмалью и хлопчатобумажной или шелковой тканью. Это повышает теплопроводность и улучшает коэффициент заполнения паза. Основными типами высокопрочных эмалированных проводов являются поливинилацеталевые провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2 и провода повышенной нагревостойкости ПЭТВ на полиэфирных лаках. Основные данные медных и алюминиевых эмалированных проводов приведены в работах [11, 19]

Алюминиевые эмалированные провода изготавливаются диаметром 0,08–0,41 мм с неотоженной (марки ПЭВАТ) и с отоженной (марки ПЭВА) алюминиевой проволокой. Эти провода относятся к классу А. Провода ПЭТВ принадлежат к классу нагревостойкости В.

К обмоточным проводам высокой нагревостойкости относятся провода марок ПНСДК и ПНСДКТ. В зависимости от температуры срок службы этих проводов изменяется. Так, при 250°С срок службы равен 15–20 000 ч, а при 400°С он снижается до 200–500 ч.

Провода со стекловолоконистой изоляцией марки ПОЖ могут длительно эксплуатироваться при 300°С. Выпускаются провода ПЭЖБ-700 с биметаллической жилой серебро–никель для длительной эксплуатации при 500°С.

При температурах, близких к абсолютному нулю, медь и алюминий становятся плохими проводниками. При этих температурах применяются сплавы ниобия с титаном и др.

Электроизоляционные материалы, или диэлектрики, применяются в электромашиностроении для изоляции частей электрической машины, находящихся под разными потенциалами.

Толщина межвитковой и пазовой изоляции во многом определяет массогабаритные показатели электрических машин. Нагревостойкость и теплопроводность изоляции определяют допустимые температуры частей машины и выбор электромагнитных нагрузок. Изоляция должна обладать необходимыми механическими свойствами и обеспечивать механизацию и автоматизацию технологических процессов изготовления.

Срок службы электрической машины в нормальных условиях работы должен быть 15–20 лет, что определяется

главным образом сроком службы изоляции. При нагреве изоляции имеют место процессы, приводящие к старению изоляции, — потери изолирующих свойств и механической прочности. Установлено, что превышение температуры примерно на 10°C над допустимой снижает срок службы электрической машины вдвое.

В основу классификации изоляции положена нагревостойкость — способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации.

Согласно ГОСТу 8865—93 электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, делятся на семь классов нагревостойкости. Классы изоляции материалов отличаются допустимой температурой в самом нагретом месте изоляции при номинальном режиме.

К классу изоляции Y (90°C) относятся текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регионированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов. К этому классу относятся также целлюлозные электроизоляционные бумаги, картоны и фибра, древесина, пластические массы с органическими наполнителями.

Класс изоляции A (105°C) включает: материалы класса Y, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики. При производстве машин материалы класса A могут пропитываться или покрываться лаками на основе натуральных смол, эфир-целлюлозными лаками и термопластичными компаундами.

В класс изоляции B (120°C) входят пленки и волокна из полиэтилентерефталата, материалы на основе электрического картона и полиэтилентерефталатной пленки, стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон, терморезистивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые).

К классу изоляции B (130°C) относятся: материалы на основе шипаной слюды, слюдопластов и слюдинитов, включая материалы с бумажной или тканевой органической подложкой; стеклолакоткани и стеклолакочулки; асбестовые волокнистые материалы; изоляция эмалированных проводов; пластмассы с неорганическим наполнителем; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов; терморезистивные синтетические компаунды; асбоцемент.

Класс нагревостойкости F (155°C) включает материалы на основе щипаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой, стекловолоконистую и асбестовую изоляцию проводов, стеклоткани и стеклолакочулки, слоистые пластики на основе стекловолоконистых и асбестовых материалов.

К классу H (180°C) относятся материалы на основе щипаной слюды без подложки или с неорганической подложкой, стекловолоконистая изоляция проводов, стеклолакоткани и стеклолакочулки, слоистые пластики на основе стекловолоконистых и асбестовых материалов, пластические массы с неорганическим наполнителем, асбоцемент, кремнийорганические эластомеры, асбестовая пряжа, бумага и ткани.

К классу нагревостойкости C (более 180°C) относятся слюда, стекло бесщелочное и стекловолоконистые материалы, электротехническая керамика, кварц, асбоцемент, шифер электротехнический, материалы из щипаной слюды без подложки или со стекловолоконистой подложкой, микалекс, политетрафторэтилен, полиамиды.

Приведенная выше классификация электроизоляционных материалов не исчерпывает всего многообразия материалов, применяемых в электромашиностроении.

Для пропитки обмоток электрических машин широко применяются пропиточные компаунды и лаки, которые обеспечивают цементацию витков, увеличивают коэффициент теплопроводности и повышают влагостойкость обмоток. Покровные лаки обеспечивают влагостойкость, маслостойкость, защиту от агрессивных веществ обмотки и других частей электрических машин.

Перспективными электроизоляционными материалами являются пленочные материалы толщиной от 10 до 200 мкм. Они обеспечивают лучший коэффициент заполнения паза, что приводит к снижению массы на единицу мощности в электрических машинах.

В электромашиностроении широко применяются пластмассы, электроизоляционные бумаги и картоны, электротехнические и слоистые пластмассы, намотанные электроизоляционные изделия, заливочные и пропиточные компаунды, лакоткани, пленочные материалы, электроизоляционные материалы на основе слюды и электрокерамические материалы.

Черные металлы наиболее часто применяются в электромашиностроении. К ним относятся литая сталь, серый чугун, ковкий чугун и различные сорта и профили прокатных

сталей. Литая сталь в электрических машинах применяется для изготовления частей машины, выполняющих одновременно роль конструктивных частей и магнитопровода, по которому замыкается постоянный поток. В машинах постоянного тока — это станина, основные и добавочные полюсы. В неявнополюсных синхронных машинах — бочка ротора, а в явнополюсном — полюсы индуктора и индуктор (обод ротора).

Литая сталь применяется для изготовления деталей с высокими механическими напряжениями — втулок коллектора, подшипниковых щитов тяговых и взрывозащищенных машин. Изготовление деталей из литья связано с большой трудоемкостью, поэтому там, где это допустимо, литая сталь заменяется сварными деталями из листовой стали.

Из ковкого чугуна изготавливаются путем отливки станины, втулки, подшипниковые щиты, нажимные шайбы, маховики, шкивы и полумуфты. Преимущество ковкого чугуна по сравнению с серым чугуном — в его пластичности и высокой износостойкости.

Сталь прокатная широко применяется при изготовлении электрических машин. В основном применяется круглая, листовая, шестигранная и квадратная сталь.

Из цветных металлов в качестве конструктивных материалов наибольшее применение в электромашиностроении находят алюминий и его сплавы с медью и оловом. Алюминиевые литые сплавы применяются для изготовления корпусов, подшипниковых щитов, вентиляторов и других деталей электрических машин. Детали из алюминиевого литья легче чугунных и стальных и могут изготавливаться более прогрессивными способами. Недостаток — ненадежность резьбы, что вызывает необходимость армирования втулками.

В качестве конструктивных материалов в электрических машинах достаточно широко применяются пластмассы. Из терморезистивных пластмасс изготавливают наборы зажимов, изоляционные втулки и др. Широко применяются спрессованные детали (щеточные пальцы, траверсы, коллекторы и др.). Пластмассы в микромашинах применяются для изготовления корпусов и подшипниковых щитов.

Прогресс в электромашиностроении в настоящее время во многом зависит от применения новых материалов, поэтому создание материалов с новыми свойствами, улучшение характеристик уже существующих материалов имеет важное значение для развития электрических машин.

1.20. Подход к проектированию электрических машин

В индуктивных электрических машинах энергия магнитного поля концентрируется в подавляющей мере в воздушном зазоре и зубцовой зоне, поэтому выбор объема воздушного зазора и расчет зубцовой зоны при синтезе — проектировании электрических машин имеют основное значение.

Удельная плотность энергии в воздушном зазоре может быть определена как отношение активной мощности машины P к объему воздушного зазора V_δ :

$$p_{уд} = \frac{P}{V_\delta}, \quad (1.167)$$

где

$$V_\delta = \pi l_\delta (R^3 - r^3) = \pi l_\delta \delta (2r + \delta) = 2\pi l_\delta \delta \rho,$$

здесь V_δ — объем полого цилиндра высотой $\delta = R - r$ и сред-

ним радиусом $\rho = \frac{R+r}{2}$.

В сериях электрических машин $p_{уд}$ при изменении мощности в широких пределах почти не изменяется. Так, для асинхронного двигателя серии 4А с параметрами $P_2 = 13$ кВт, $n = 1500$ об/мин $p_{уд} = 0,47 \cdot 10^6$ Вт/м³, с параметрами $P_2 = 250$ кВт, $n = 1000$ об/мин $p_{уд} = 0,52 \cdot 10^6$ Вт/м³. В турбогенераторе мощностью $P_2 = 1,2$ млн кВт $p_{уд} \approx 1 \cdot 10^6$ Вт/м³. При различии в конструкции и различии мощностей в 105 раз $p_{уд}$ отличается меньше чем в 2 раза. Синтез электрической машины удобно начинать с выбора удельной мощности воздушного зазора, а затем, определив объем воздушного зазора, проектировать магнитную систему и обмотки. Проектирование неотделимо от конструирования и технологии изготовления электрических машин.

Расчетные методы развивались и совершенствовались вместе с развитием теории электрических машин. В основе большинства их лежит выбор машинной постоянной, которая определяется из допустимых электромагнитных нагрузок:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta n}{P'} = \frac{2}{kAB_\delta}, \quad (1.168)$$

где D — диаметр якоря машины постоянного тока или внутренний диаметр статора машины переменного тока, м; n — частота вращения, об/мин; P' — расчетная мощность, Вт;

k — коэффициент, учитывающий полюсное перекрытие α_δ , обмоточный коэффициент $k_{\text{об}}$ и коэффициент формы поля k_B ($k = \pi \alpha_\delta k_{\text{об}} k_B$) [7].

Проектирование электрических машин начинают с выбора электромагнитных нагрузок — индукции в воздушном зазоре B_δ , и линейной нагрузки A , А/м, определяемой током всех витков обмотки на единицу длины окружности статора:

$$A = \frac{2\pi \omega I}{\pi D}. \quad (1.169)$$

Значения C_A , B_δ и A для машин с различной мощностью и частотой вращения приводятся в книгах по проектированию электрических машин.

Индукция в воздушном зазоре выбирается таким образом, чтобы в зубцах она не превышала 1,4–1,8 Тл, а линейная нагрузка в машинах общего назначения должна быть не более 40 000 А/м.

Чем выше электромагнитные нагрузки, тем меньше габариты, а следовательно, и стоимость машины, которая определяется в основном массой активных материалов — стали и меди. Однако с ростом электромагнитных нагрузок растут потери, снижается КПД, поэтому существуют оптимальные соотношения между A , B_δ и размерами машины.

Наиболее нагретой частью машины являются обмотки ротора и статора. Допустимая температура изоляции обмоток в зависимости от класса изоляции колеблется в пределах 105–180°С. При проектировании необходимо рационально распределить активные материалы, выбрать конструкцию и систему охлаждения машины.

Температура отдельных частей машины зависит от конструкции машины, системы охлаждения и режима работы. Количество тепла, которое может быть отведено в окружающее пространство при естественном охлаждении, определяется поверхностью электрической машины, при других системах охлаждения — объемом охлаждающего агента, проходящего внутри машины.

При проектировании серий электрических машин стремятся машины различной мощности делать геометрически подобными. В геометрически подобных электрических машинах отношение активной длины l_δ к диаметру магнитопровода статора или якоря машины D при изменении мощности машины остается постоянным.

В геометрически подобных электрических машинах, рассчитанных для одной и той же частоты сети и частоты вращения и при одних и тех же электромагнитных нагрузках, мощность машины пропорциональна базисному размеру l в четвертой степени: $P \sim l^4$. Это следует из того, что при увеличении длины машины $l_\delta \sim l$ и диаметр машины $D \sim l$. При увеличении длины и диаметра машины сечение магнитопровода пропорционально l^2 , что дает возможность увеличить пропорционально квадрату приложенное напряжение U^2 . При этом и сечение меди увеличивается пропорционально l^2 .

Стоимость машины можно считать пропорциональной массе машины, т.е. стоимость пропорциональна l^3 . Потери в электрических машинах пропорциональны массе активных материалов, т.е. они пропорциональны l^3 . Поэтому выгодно строить одну мощную электрическую машину, в которой ниже удельные потери и которая требует меньше активных материалов на единицу мощности, чем несколько машин на ту же мощность. В последние десятилетия наблюдался значительный рост единичной мощности турбо- и гидрогенераторов. Мощность турбогенераторов достигла 1 млн 600 тыс. кВт в единице, гидрогенераторов — более 800 тыс. кВт, трансформаторов — 1 млн кВт·А на фазу.

Достигнуты значительные успехи в проектировании и производстве электрических машин. Однако число новых машин, которые надо создавать, непрерывно растет и необходимо улучшать энергетические показатели и снижать массу машины. В последние годы для ускорения проектирования и повышения качества расчетных работ созданы автоматизированные системы проектирования электрических машин [11, 17]. Автоматизированные системы проектирования — это комплекс ЭВМ, позволяющий производить расчетные и проектно-конструкторские работы. Система алгоритмов и пакетов прикладных программ обеспечивает проектирование электрических машин при взаимодействии человека с ЭВМ.

Глава 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. Назначение и общие сведения о трансформаторах

Трансформаторы — электромагнитные статические преобразователи электрической энергии. Основное назначение трансформаторов — изменять напряжение переменного тока. Они применяются также для преобразования числа фаз и частоты. Наибольшее распространение имеют силовые трансформаторы напряжения, которые выпускаются электротехнической промышленностью на мощности свыше миллиона киловольт-ампер и на напряжения до 1150—1500 кВ.

Для передачи и распределения электрической энергии необходимо повысить напряжение турбогенераторов и гидрогенераторов, установленных на электростанциях, с 16—24 кВ до напряжений 110, 150, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ, используемых в линиях передачи, а затем снова понизить до 35; 10; 6; 3; 0,66; 0,38 и 0,22 кВ, чтобы использовать энергию в промышленности, сельском хозяйстве и быту. Так как в энергетических системах имеет место многократная трансформация, мощность трансформаторов в 7—10 раз превышает установленную мощность генераторов на электростанциях. Силовые трансформаторы в нашей стране выпускаются в основном на частоту 50 Гц.

Трансформаторы малой мощности широко используются в различных электротехнических установках, системах передачи и переработки информации, навигации и других устройствах. Диапазон частот, на которых могут работать трансформаторы, — от нескольких герц до 10^5 Гц.

По числу фаз трансформаторы делятся на *однофазные*, *двухфазные*, *трехфазные* и *многофазные*. Силовые трансформаторы выпускаются в основном в трехфазном исполнении. Для применения в однофазных сетях выпускаются однофазные трансформаторы.

Трансформаторы имеют две или несколько обмоток, индуктивно связанных друг с другом. Обмотки, потребляющие энергию из сети, называются *первичными*. Обмотки, отдающие электрическую энергию потребителю, называются *вторичными*.

Многофазные трансформаторы имеют обмотки, соединенные в многолучевую звезду или многоугольник. Трехфазные трансформаторы имеют соединение в трехлучевую звезду и треугольник.

В зависимости от соотношения напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформаторы делятся на *повышающие* и *понижающие*. В повышающем трансформаторе первичная обмотка имеет низкое напряжение, а вторичная — высокое. В понижающем трансформаторе, наоборот, вторичная обмотка имеет низкое напряжение, а первичная — высокое.

Трансформаторы, имеющие одну первичную и одну вторичную обмотки, называются *двухобмоточными*. Достаточно широко распространены *трехобмоточные* трансформаторы, имеющие на каждую фазу три обмотки, например, две на стороне низкого напряжения, одну — на стороне высокого напряжения или наоборот. Многофазные трансформаторы могут иметь несколько обмоток высокого и низкого напряжения.

По конструкции силовые трансформаторы делят на два основных типа — *масляные* и *сухие*. В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками находится в баке, заполненном трансформаторным маслом, которое является хорошим изолятором и охлаждающим агентом. Сухие трансформаторы охлаждаются воздухом. Они применяются в жилых и промышленных помещениях, в которых эксплуатация масляного трансформатора является нежелательной.

Трансформаторное масло является горючим, и при нарушении герметичности бака масло может повредить другое оборудование.

Наряду с трансформаторами широко применяются автотрансформаторы, в которых имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками. При этом мощность из одной обмотки в другую передается как магнитным полем, так и за счет электрической связи. Автотрансформаторы строятся на большие мощности и высокие напряжения и применяются в энергосистемах, а также используются для регулирования напряжения в установках небольшой мощности.

Номинальные данные трансформатора, на которые он рассчитан с заводской гарантией на 25 лет, указываются в паспортной табличке трансформатора: номинальная полная мощность $S_{\text{ном}}$, кВ·А, номинальное линейное напряжение $U_{\text{л. ном}}$, В или кВ, номинальный линейный ток $I_{\text{л. ном}}$, А, номинальная частота f , Гц, число фаз m , схема и группа соединения обмоток, напряжение короткого замыкания $U_{\text{к}}$, %, режим работы и способ охлаждения. В табличке приводятся также данные, необходимые для монтажа: полная масса, масса масла, масса выемной (активной) части трансформатора. Указываются тип трансформатора в соответствии с ГОСТ 11977—85 на марки трансформаторов, завод-изготовитель и год выпуска.

Номинальная мощность однофазного трансформатора $S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}$, а трехфазного $S_{\text{ном}} = \sqrt{3} U_{1\text{л. ном}} I_{1\text{л. ном}} = 3 U_{1\text{ф. ном}} I_{1\text{ф. ном}}$, где $U_{1\text{л. ном}}$, $U_{1\text{ф. ном}}$, $I_{1\text{л. ном}}$ и $I_{1\text{ф. ном}}$ — соответственно номинальные линейные и фазные значения напряжений и токов.

Номинальными напряжениями трансформатора являются линейные напряжения при холостом ходе на первичной и вторичной обмотках трансформатора. За номинальные токи первичной и вторичной обмоток принимаются токи, рассчитанные по номинальной мощности при номинальных первичных и вторичных напряжениях.

Ввиду общности конструкции и методов расчета к трансформаторам могут быть отнесены реакторы, дроссели насыщения и сверхпроводящие индуктивные накопители. Большая группа электромагнитных устройств, применяемых в системах автоматического управления, — магнитные усилители, различные датчики, измерительные трансформаторы — хотя и имеет общие уравнения с силовыми трансформаторами, рассматривается в различных смежных курсах.

2.2. Уравнения трансформатора

Схему трансформатора можно получить из схемы обобщенной машины (см. рис. 1.25), когда $\omega_p = 0$ и между неподвижными обмотками статора и ротора, сдвинутыми на электрический угол, равный 90° , магнитные связи отсутствуют.

Рассмотрим вначале уравнения ненасыщенного однофазного двухобмоточного трансформатора, у которого число витков первичной обмотки w_1 равно числу витков вторичной обмотки w_2 . На рис. 2.1 дана схема однофазного

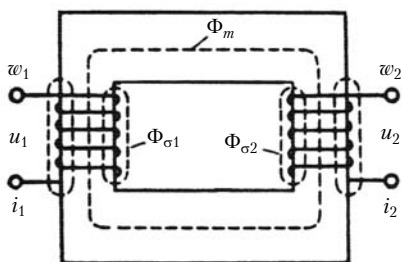


Рис. 2.1. Схема однофазного трансформатора

трансформатора, на которой для удобства изображения первичная и вторичная обмотки расположены на разных стержнях. В реальных трансформаторах для обеспечения лучшей магнитной связи обмотки располагаются на одном стержне.

Для анализа процессов преобразования энергии

в трансформаторе удобно представить, что имеются рабочий поток Φ_m , сцепленный с обеими обмотками, и потоки рассеяния первичной $\Phi_{\sigma 1}$ и вторичной $\Phi_{\sigma 2}$ обмоток. Потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ сцеплены лишь с одной обмоткой; u_1 и i_1 — напряжение и ток первичной обмотки; u_2 и i_2 — напряжение и ток вторичной обмотки.

Для двухобмоточного трансформатора по схеме рис. 2.1 могут быть записаны следующие уравнения:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ -u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1 + pL_1 & pM \\ pM & r_2 + pL_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{Bmatrix}, \quad (2.1)$$

где $p \rightleftharpoons \frac{d}{dt}$; r_1 и r_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток; M — взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками (определяется рабочим потоком Φ_m); L_1 и L_2 — соответственно индуктивности первичной и вторичной обмоток. Знак « $-$ » перед напряжением u_2 показывает, что активная мощность передается из первичной во вторичную обмотку, к которой присоединена нагрузка.

Дифференциальные уравнения (2.1) получаются из уравнений обобщенной машины (1.100), если рассматривать связи обмоток по одной оси при частоте вращения ротора, равной нулю, и заменить индексы « α » и « β » на «1» и «2», отнеся их соответственно к первичной и вторичной обмоткам трансформатора.

Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Для усиления связи обмотки располагаются на ферромагнитном сердечнике — магнитопроводе.

Анализ уравнений трансформатора начнем с уравнений идеального трансформатора. В идеальном трансформаторе $r_1 = 0$ и $r_2 = 0$ и потери в стали магнитопровода не учитываются. Магнитная проницаемость стали $\mu_{ст} = \infty$, весь поток замыкается по стали, и потоки рассеяния равны нулю.

Электромагнитная связь между обмотками трансформатора характеризуется коэффициентом электромагнитной связи (см. рис. 2.1)

$$c = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (2.2)$$

Для идеального трансформатора, в котором нет потерь и весь поток сцеплен с первичной и вторичной обмотками (рассеяние отсутствует), $c = 1$, т.е. связь между обмотками полная.

В реальных трансформаторах существуют потоки рассеяния первичной $\Phi_{\sigma 1}$ и вторичной $\Phi_{\sigma 2}$ обмоток, поэтому электромагнитная связь в них неполная и $c < 1$. В связи с этим вводится понятие коэффициента электромагнитного рассеяния:

$$\sigma = 1 - c^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}. \quad (2.3)$$

Потоки рассеяния имеют важное значение для процессов электромагнитного преобразования в трансформаторах, и считать, что они вредные, и стараться свести их к нулю не следует.

В силовых трансформаторах имеет место высокий коэффициент электромагнитной связи ($c = 0,93 \div 0,999$), соответственно невелико и рассеяние ($\sigma = 0,07 \div 0,001$).

В идеальном трансформаторе при синусоидально изменяющемся магнитном потоке

$$\begin{cases} u_1 = -e_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = \omega_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = \omega \omega_1 \Phi_m \cos \omega t, \\ u_2 = e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\omega_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega \omega_2 \Phi_m \cos \omega t. \end{cases} \quad (2.4)$$

В уравнениях (2.4) Φ_m — амплитудное значение потока трансформатора, а $u \approx e$, так как падения напряжения на обмотках равны нулю. При этом действующие значения ЭДС

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\omega \omega_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \pi \sqrt{2} f \omega_1 \Phi_m = 4,44 f \omega_1 \Phi_m, \\ E_2 = \frac{\omega \omega_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \pi \sqrt{2} f \omega_2 \Phi_m = 4,44 f \omega_2 \Phi_m, \end{cases} \quad (2.5)$$

здесь $\omega = 2\pi f$.

Отношение напряжений в идеальном трансформаторе называется коэффициентом трансформации:

$$n_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (2.6)$$

Так как в идеальном трансформаторе $U_2 I_2 = U_1 I_1$, то токи в первичной и вторичной обмотках можно определить по формулам

$$\frac{I_2}{I_1} = n_{12}; \quad I_2 = n_{12} I_1. \quad (2.7)$$

В реальных трансформаторах эти соотношения практически не нарушаются, так как в силовых трансформаторах потоки рассеяния и активные сопротивления обмоток относительно невелики. Уравнения (2.1) могут быть переписаны в виде

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + p L_1 i_1 + p M i_2, \\ -u_2 = p M i_1 + i_2 r_2 + p L_2 i_2. \end{cases} \quad (2.8)$$

Уравнения (2.1) и (2.8) описывают переходные и установившиеся режимы работы трансформатора. Чтобы получить комплексные уравнения трансформатора, характеризующие только установившиеся режимы работы, нужно в уравнениях (2.1) или (2.8) заменить $p \Leftrightarrow \frac{d}{dt} \Leftrightarrow j\omega$. После замены $p \Leftrightarrow j\omega$ из уравнений (2.8) имеем

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2, \\ -\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1. \end{cases} \quad (2.9)$$

Полное индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$\omega L_1 = \omega M + \omega L_{\sigma 1}, \quad (2.10)$$

где $L_{\sigma 1}$ — индуктивность рассеяния первичной обмотки, соответствующая потоку рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$; $\omega L_{\sigma 1}$ — индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки; ωM — индуктивное сопротивление взаимной индукции. Индуктивное сопротивление вторичной обмотки

$$\omega L_2 = \omega M + \omega L_{\sigma 2}, \quad (2.11)$$

где $L_{\sigma 2}$ — индуктивность рассеяния вторичной обмотки; $\omega L_{\sigma 2}$ — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки;

Подставляя уравнение (2.10) в первое уравнение (2.9), получаем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\omega M \dot{I}_1 + j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2. \quad (2.12)$$

Вводя ток \dot{I}_0 , равный

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \quad (2.13)$$

и подставляя выражение (2.13) в уравнение (2.12), имеем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\omega M \dot{I}_0 + j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1. \quad (2.14)$$

Здесь $\omega M \dot{I}_0 = -\dot{E}_1$, $\omega L_{\sigma} = x_1$. Тогда

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1, \quad (2.15)$$

где сопротивление первичной обмотки

$$z_1 = r_1 + jx_1. \quad (2.16)$$

Преобразуя второе уравнение в выражениях (2.9), как это было сделано для первого уравнения, получаем

$$-\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j\omega M \dot{I}_0 + j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2. \quad (2.17)$$

В уравнении (2.17) $\omega L_{\sigma 2}$ — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки и $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$, тогда

$$-\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 z_2, \quad (2.18)$$

где сопротивление вторичной обмотки

$$z_2 = r_2 + jx_2, \quad (2.19)$$

а ЭДС первичной и вторичной обмоток

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -j\omega M \dot{I}_0. \quad (2.20)$$

Тогда комплексные уравнения трансформатора с одинаковым числом витков первичной и вторичной обмоток (приведенного трансформатора) примут вид

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1, \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \end{cases} \quad (2.21)$$

Если к уравнению трансформатора (2.21) добавить уравнение нагрузки

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z, \quad (2.22)$$

получим уравнения, описывающие работу трансформатора в установившихся режимах.

2.3. Векторная диаграмма трансформатора

Для уравнений трансформатора может быть предложена векторная диаграмма, являющаяся геометрической интерпретацией уравнений трансформатора на комплексной плоскости.

Так как коэффициент трансформации может достигать нескольких десятков, строить диаграмму с векторами первичной и вторичной обмоток, отличающимися в несколько десятков раз, неудобно. Поэтому принято векторную диаграмму и схему замещения рассматривать для приведенного трансформатора.

В приведенном трансформаторе числа витков первичной и вторичной обмоток одни и те же ($w_1 = w_2$). При этом все электромагнитные процессы в реальном и приведенном трансформаторах протекают одинаково. В реальном и приведенном трансформаторах остаются неизменными потери, МДС, магнитные потоки, активные и реактивные мощности. Если определять коэффициент трансформации как отношение витков первичной обмотки к виткам вторичной (2.6), то можно для приведенного и реального трансформаторов составить следующие соотношения:

Реальный трансформатор	Приведенный трансформатор
w_2	$w'_2 = w_1$
\dot{E}_2	$\dot{E}'_2 = n_{12}\dot{E}_2$
\dot{U}_2	$\dot{U}'_2 = n_{12}\dot{U}_2$
\dot{I}_2	$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{n_{12}}$
r_2	$r'_2 = n_{12}^2 r_2$
x_2	$x'_2 = n_{12}^2 x_2$

Приведение напряжений и токов следует из равенства мощностей реальной и приведенной обмоток трансформатора:

$$\dot{U}_2 \dot{I}_2 = \dot{U}'_2 \dot{I}'_2. \quad (2.23)$$

Магнитодвижущие силы приведенной и реальной обмоток одинаковые

$$\dot{I}_2 w'_2 = \dot{I}_2 w_2. \quad (2.24)$$

Чтобы магнитные поля в реальном и приведенном трансформаторах оставались неизменными, должны выполняться равенство (2.24) и сохраняться конфигурация обмоток. При этом сечения приведенной и реальной обмоток должны быть одинаковыми, поэтому сечение витка приведенной обмотки изменяется в n_{12} раз.

Активное сопротивление приведенной обмотки в n_{12}^2 раз больше, чем активное сопротивление реальной обмотки, из-за изменения в n_{12} раз числа витков и сечения витка:

$$r'_2 = n_{12}^2 r_2. \quad (2.25)$$

Так как при неизменных геометрических размерах индуктивные сопротивления зависят от квадрата числа витков

$$x'_2 = n_{12}^2 x_2, \quad (2.26)$$

то при этом

$$z'_2 = n_{12}^2 z_2. \quad (2.27)$$

Эти соотношения могут быть получены и из равенства активных и реактивных мощностей трансформаторов.

Для трансформатора с приведенными обмотками уравнения выглядят следующим образом:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \quad (2.28)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2; \quad (2.29)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \quad (2.30)$$

Геометрической интерпретацией уравнений (2.28)–(2.30) является векторная диаграмма приведенного трансформатора (рис. 2.2, а).

Построение диаграммы лучше начать с уравнения (2.30), отложив поток в фазе Φ_m , а затем строить уравнения (2.28) и (2.29).

Мощность, подводимая к первичной обмотке трансформатора (см. рис. 2.2, а),

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (2.31)$$

Мощность, отдаваемая в нагрузку (мощность на вторичной обмотке),

$$P_2 = U'_2 I'_2 \cos \varphi_2, \quad (2.32)$$

при этом $P_2 < P_1$, так как часть мощности расходуется на потери в трансформаторе.

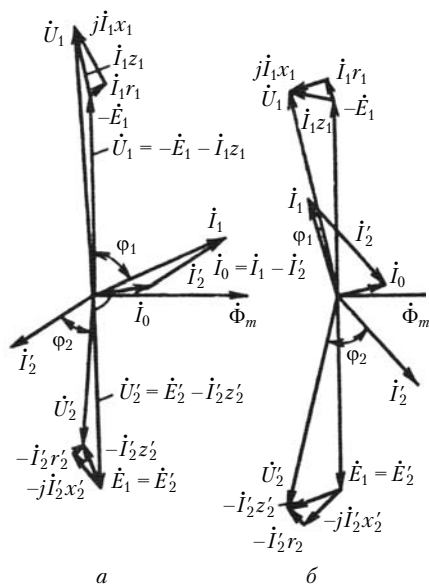


Рис. 2.2. Векторная диаграмма трансформатора при смешанной активно-индуктивной нагрузке (а) и активно-емкостной (б) нагрузке

На рис. 2.3 дана энергетическая диаграмма активной мощности трансформатора. Часть активной мощности расходуется на потери в меди первичной $I_1^2 r_1$ и вторичной $(I_2')^2 r_2'$ обмотках. Кроме потерь в меди есть потери в стали, которые могут определяться через E_1 и активную составляющую тока холостого хода I_{0a} . Обмотки трансформаторов выполняются из меди и алюминия. Поэтому точнее говорить о потерях в металле обмоток, но принято эти потери называть потерями в меди, и пока нет необходимости заменять сложившуюся терминологию. Потери в меди иногда называют электрическими потерями.

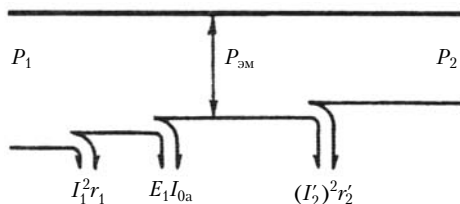


Рис. 2.3. Энергетическая диаграмма активной мощности трансформатора

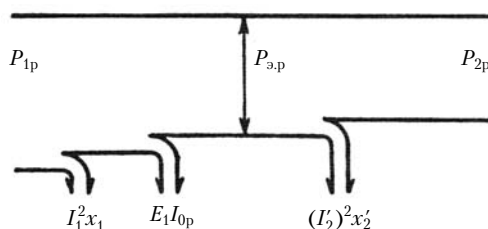


Рис. 2.4. Энергетическая диаграмма реактивной мощности трансформатора

Электромагнитная мощность трансформатора — это мощность, которая передается магнитным полем из первичной обмотки во вторичную или наоборот. Трансформаторы обратимы: как активная, так и реактивная мощность может передаваться из первичной обмотки во вторичную или из вторичной в первичную.

Для образования поля в трансформаторе необходима реактивная мощность, которая идет на создание основного поля — поля взаимной индукции — и полей рассеяния первичной и вторичной обмоток.

На рис. 2.4 представлена энергетическая диаграмма реактивной мощности трансформатора. По векторной диаграмме реактивная мощность, поступающая в первичную обмотку, равна

$$P_{1р} = U_1 I_1 \sin \varphi_1. \quad (2.33)$$

На создание поля рассеяния расходуется мощность $I_1^2 x_1$, а реактивная мощность

$$P_{1р} - I_1^2 x_1 = U_1 I_1 \sin \varphi - I_1^2 x_1 \quad (2.34)$$

сосредотачивается в поле взаимной индукции. На создание поля рассеяния вторичной обмотки идет реактивная мощность $(I_2')^2 x_2'$. Реактивная составляющая электромагнитной мощности $P_{э.р}$ — это мощность, которая передается от первичной обмотки ко вторичной (см. рис. 2.4).

Если нагрузка трансформатора индуктивная, реактивная мощность от трансформатора поступает в нагрузку. Если нагрузка трансформатора емкостная и активная, то при большой емкости реактивная мощность поступает в трансформатор и в сеть. При этом $P_{2р} > P_{1р}$. Направления активной и реактивной мощностей могут совпадать или быть встречными.

Как следует из векторной диаграммы трансформатора, при смешанной емкостной нагрузке $U_2 > U_1$ (см. рис. 2.2, б). При чисто емкостной нагрузке возрастание напряжения на вторичной обмотке может быть столь значительным, что это окажется опасным для изоляции. Возрастание напряжения на трансформаторе при емкостной нагрузке называется перевозбуждением трансформатора.

2.4. Схема замещения трансформатора

Для уравнений приведенного трансформатора в установленном режиме (2.28)–(2.30) может быть предложена электрическая схема замещения (рис. 2.5). Действительно, если представить, что к выводам вторичной обмотки подключена нагрузка $z'_н$, то $\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 z'_н$. Решая совместно уравнения (2.28)–(2.30), получаем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left[z_1 + \frac{z_0(z'_н + z'_2)}{z_0 + z'_н + z'_2} \right] = \dot{I}_1 z_3. \quad (2.35)$$

Нетрудно убедиться, что, согласно схеме замещения трансформатора, напряжение на первичной обмотке определяется по выражению (2.35).

Электрические схемы замещения имели большое значение в развитии теории электрических машин. Они позволяют сложные процессы, происходящие в трансформаторах и электрических машинах с перемещающимися обмотками, свести к процессам в определенным образом соединенных активных и индуктивных сопротивлениях.

В схеме замещения имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками, что позволяет исключить из рассмотрения магнитные связи.

В уравнениях (2.21) и (2.28)–(2.30) потери в магнитопроводе не учитываются. Их можно приближенно учесть, увеличив активное сопротивление первичной обмотки r_1

или введя в z_0 активное сопротивление потерям в стали:

$$z_0 = r_0 + ix_0, \quad (2.36)$$

где магнитные потери (потери в стали)

$$I_0^2 r_0 = \frac{E_1^2}{z_0^2} r_0. \quad (2.37)$$

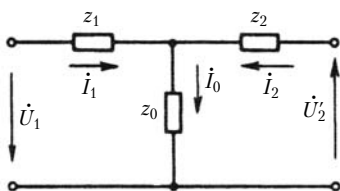


Рис. 2.5. Т-образная схема замещения трансформатора

Потери в стали пропорциональны $E_1^2 = (E'_2)^2$. Так как $\Phi_m \sim E$, потери в стали пропорциональны Φ_m или B^2 . Если не учитывать падение напряжения на z_1 , потери в стали можно, с большой точностью, считать пропорциональными квадрату напряжения U_1^2 . Т-образную схему замещения (см. рис. 2.5) можно видоизменить, представив ветвь намагничивания состоящей из двух сопротивлений (рис. 2.6). Из схемы замещения рис. 2.6

$$\dot{I}_{0a} = \frac{\dot{E}_1}{r_{12}}; \quad (2.38)$$

$$\dot{I}_{0p} = \frac{\dot{E}_1}{jx_{12}}. \quad (2.39)$$

На схеме рис. 2.6 параметры намагничивающего контура r_{12} и jx_{12} представлены в виде сосредоточенных параметров. В действительности они распределенные. Используя выражения (2.38) и (2.39), можно прийти к схеме, в которой активное и реактивное сопротивления намагничивающего контура соединены последовательно (рис. 2.7). В этой схеме замещения $z_1 = r_1 + jx_1$; $z'_2 = r'_2 + jx'_2$; $z_0 = r_0 + jx_0$. В схему рис. 2.7 входят активные сопротивления первичной и вторичной обмоток r_1 и r'_2 , индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток x_1 и x'_2 , а также сопротивление, эквивалентное потерям в стали, r_{12} и сопротивление взаимной индукции x_{12} .

Уравнения установившегося режима, векторная диаграмма и схема замещения позволяют проанализировать работу трансформатора в установившемся режиме.

Когда $z_n = \infty$, имеет место холостой ход трансформатора ($\dot{I}'_2 = 0$). При этом трансформатор потребляет из сети ток холостого хода, который идет на создание поля в трансформа-

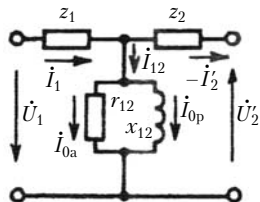


Рис. 2.6. Схема замещения трансформатора с двумя сопротивлениями в ветви намагничивания

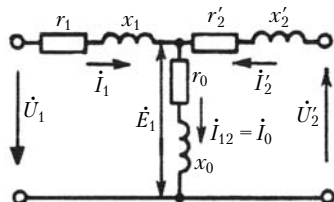


Рис. 2.7. Видоизменение схемы замещения трансформатора

торе и покрытие потерь в стали. Ток холостого хода имеет в основном реактивную составляющую.

При нагрузке во вторичной обмотке протекает ток \dot{I}_2' , который растет при увеличении нагрузки. В первичной обмотке при увеличении нагрузки также растет ток \dot{I}_1 , при этом токи \dot{I}_2' и \dot{I}_1 имеют встречное направление и их сумма, практически, не изменяется (см. уравнение (2.30)). Это хорошо видно и на векторной диаграмме (см. рис. 2.2), которая является геометрической интерпретацией уравнений трансформатора. Ток холостого хода \dot{I}_0 при нагрузке не растет и даже уменьшается за счет падения напряжения на первичной обмотке. При изменении нагрузки во вторичной обмотке изменяется потребляемая из сети мощность в первичной обмотке, а поток Φ_m в трансформаторе почти не изменяется, так как из векторной диаграммы и схемы замещения очевидно, что \dot{E}_1 и \dot{E}_2' ($\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$) почти не изменяются, поскольку падение напряжения на первичной обмотке мало.

При емкостной нагрузке реактивная мощность в трансформатор поступает с выводов вторичной обмотки. При $\cos \varphi_1 = 1$ реактивная мощность из сети \dot{U}_1 не поступает, а реактивная мощность для создания поля трансформатора поступает из сети \dot{U}_2' .

При увеличении емкости во вторичной обмотке реактивная мощность не только идет на создание поля в трансформаторе, но и поступает в сеть \dot{U}_1 .

Для того чтобы из сети \dot{U}_2' активная мощность поступала в сеть \dot{U}_1 , необходимо, чтобы $\dot{U}_2' > \dot{E}_1$. При этом на векторной диаграмме (см. рис. 2.2, а) при активно-индуктивной и активной нагрузках $\dot{U}_2' > \dot{U}_1$.

2.5. Трехфазные трансформаторы

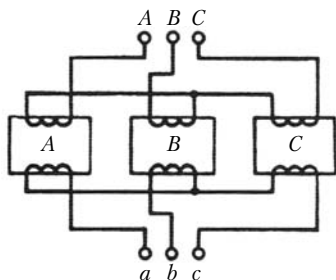


Рис. 2.8. Трехфазная группа однофазных трансформаторов

Распределительные сети в энергосистемах являются трехфазными, поэтому большинство силовых трансформаторов выпускается трехфазными. Чтобы применить трансформаторы в трехфазной системе напряжений, можно воспользоваться тремя однофазными трансформаторами (рис. 2.8).

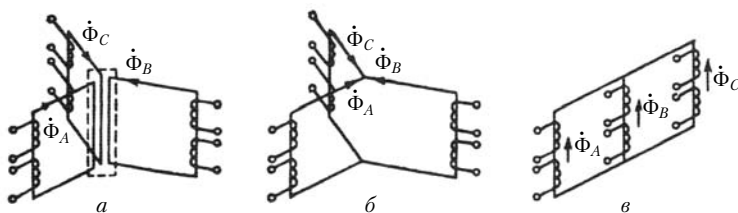


Рис. 2.9. Трехфазный трансформатор, полученный путем совмещения трех однофазных трансформаторов

Путем совмещения магнитных систем трех однофазных трансформаторов можно получить трехфазный трансформатор с общей магнитной системой (рис. 2.9, а). Так как в трехфазной системе $\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$, можно три стержня, обведенных штриховой линией на рис. 2.9, а, не выполнять, что позволяет перейти к схемам рис. 2.9, б и в.

Трехфазные трансформаторы со стержнями, расположенными в одной плоскости, получили наибольшее распространение. Присущая им небольшая несимметрия из-за того, что фаза, расположенная на среднем стержне, находится несколько в иных условиях, чем фазы на крайних стержнях, при эксплуатации не имеет большого значения.

Намагничивающие токи обмоток фаз, размещенных на крайних сердечниках, больше, чем в средней, на 10—15%. При холостом ходе эти токи образуют несимметричную систему. Током холостого хода считается среднее арифметическое токов трех фаз.

Следует отметить, что как на первых порах развития трансформаторостроения, так и сейчас выпускаются трансформаторы со сдвигом в пространстве стержней на 120° (см. рис. 2.9, б).

Трехфазный трансформатор был получен путем объединения трех однофазных, поэтому рабочие процессы в нем протекают так же, как в трех однофазных, и для фазы трехфазного трансформатора справедливы дифференциальные и комплексные уравнения, векторная диаграмма и схема замещения однофазного трансформатора. В трехфазном трансформаторе рабочие процессы в большинстве случаев исследуют для одной фазы и считают, что в других фазах они протекают аналогично лишь со сдвигом во времени.

Для трансформации напряжений в трехфазных системах используются как трансформаторы с общей магнитной сис-

темой, так и трехфазная группа однофазных трансформаторов. При использовании трансформаторов предельной мощности легче на большую мощность выполнить три однофазных трансформатора. При изготовлении трансформаторов массовых серий выполняются трехфазные трансформаторы с общим магнитопроводом, так как при этом достигается экономия в материалах и уменьшается трудоемкость при изготовлении.

Строго теорию однофазного трансформатора применять к трехфазному трансформатору с общей магнитной системой можно лишь в установившихся симметричных режимах. При исследовании динамики, несимметричных и других режимов следует учитывать наличие общей магнитной системы.

Сказанное относится не только к трехфазным, но и к многофазным трансформаторам. Из многофазных трансформаторов находят редкое применение шести- и девятифазные трансформаторы.

Далее все процессы в трансформаторах будут рассмотрены применительно к однофазным трансформаторам. Все полученные выводы будут справедливы и для каждой фазы многофазных трансформаторов.

2.6. Параметры схемы замещения трансформатора

Т-образная схема замещения трансформатора состоит из трех сопротивлений z_1 , z'_2 и z_{12} , в которые входят активные и индуктивные сопротивления. Определение параметров — сопротивлений схемы замещения — может быть проведено опытным и расчетным путями.

Для определения параметров схемы замещения необходимо провести два опыта — холостого хода и короткого замыкания. При определении параметров расчетным путем рассматривают режимы холостого хода и короткого замыкания.

Холостой ход трансформатора. Уравнения трансформатора при холостом ходе, когда $\dot{I}'_2 = 0$, а $z_n = \infty$, выглядят следующим образом:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \quad (2.40)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2; \quad (2.41)$$

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1. \quad (2.42)$$

Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе показана на рис. 2.10. Схема замещения при холостом ходе

может быть получена из Т-образной схемы, если считать $\dot{I}'_2 = 0$ (рис. 2.11).

При исследовании трехфазного трансформатора в опыте холостого хода (рис. 2.12) к первичной обмотке трансформатора подводится регулируемое напряжение в пределах $(0,3 \div 1,2)U_{\text{ном}}$ ($U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение на первичной обмотке). Опыт холостого хода может проводиться и при питании со стороны вторичной обмотки. Обычно питание осуществляется со стороны низкого напряжения, так как это облегчает проведение экспериментов.

В опыте холостого хода снимаются зависимости тока холостого хода I_x , потерь холостого хода P_x , $\cos \varphi_x$ от напряжения (рис. 2.13).

Ток холостого хода сначала линейно зависит от U_x , а при $U_x \approx (0,6 \div 0,8)U_{\text{ном}}$ из-за насыщения отклоняется от линейной зависимости. При $U_x = (1,1 \div 1,2)U_{\text{ном}}$, когда магнитная система трансформатора насыщена, I_x снова изменяется по линейному закону. При насыщении растет реактивная мощность, поэтому $\cos \varphi_x$ с увеличением напряжения падает.

Потери при холостом ходе P_x — это потери в стали магнитопровода трансформатора. Ток холостого хода в силовых трансформаторах составляет 0,8–10%. В трансформаторах 200 000–630 000 кВ·А ток холостого хода составляет 0,5–0,4%. Поэтому электрические потери в 10^2 – $5 \cdot 10^4$ раз меньше электрических потерь при номинальном режиме. Считают, что потери при холостом ходе — это потери в стали.

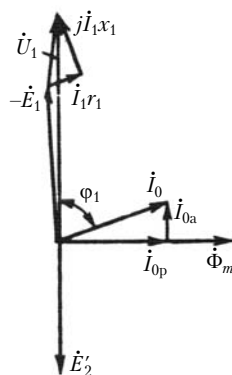


Рис. 2.10. Векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе

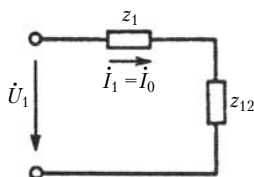


Рис. 2.11. Схема замещения трансформатора при холостом ходе

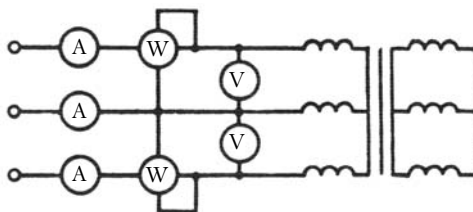


Рис. 2.12. Схема проведения опыта холостого хода и короткого замыкания для трехфазного трансформатора

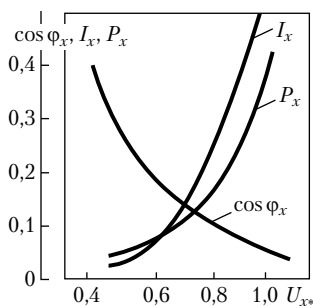


Рис. 2.13. Характеристики холостого хода трансформатора ($P = 100$ кВ·А, $f = 50$ Гц, $U = 6,3/0,22$ кВ)

Определив потери холостого хода P_x , можно найти активное сопротивление схемы замещения r_0 , эквивалентное потерям в стали: $P_x = mI_x^2(r_1 + r_0)$, но $r_1 \ll r_0$, поэтому можно считать, что $P_x = mI_x^2r_0$. Сопротивление взаимной индукции

$$z_0 = \frac{U_x}{I_x}. \quad (2.43)$$

Зная полное сопротивление и $r_0 = \frac{P_x}{mI_x^2}$, определяют

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (2.44)$$

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора r_1 и r_2' находятся опытным путем при питании обмоток постоянным током. Активные, или, вернее, омические, сопротивления находят делением постоянного напряжения на ток.

Сопротивления схемы замещения трансформатора z_0 , x_0 , r_0 зависят от напряжения. С ростом U_x из-за насыщения z_0 и x_0 уменьшаются и ток увеличивается. Насыщение в трансформаторе — индукция B_m — зависит от приложенного к обмоткам напряжения U_ϕ , числа витков фазы обмотки w и сечения магнитопровода S : $U_\phi = 4,44 f B_m S w$.

Потери в стали пропорциональны B^2 и частоте $f^{1,3}$ приближенно. Чтобы уменьшить потери в стали, надо уменьшать в первую очередь индукцию в стержнях и ярмах магнитопровода трансформатора.

В относительных единицах при $U_x = U_{ном}$ обычно $z_{0*} \approx x_{0*} = 33 \div 330$ и $r_{0*} = 5 \div 65$. Последние числа относятся к мощным трансформаторам. Сопротивления r_1 и x_1 в сотни раз меньше r_0 и x_0 . Для мощных трансформаторов с большой точностью можно считать, что параметры схемы замещения при холостом ходе определяются параметрами намагничивающего контура.

Из опыта холостого хода определяют коэффициент трансформации как отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках при холостом ходе:

$$n_{12} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (2.45)$$

Индуктивные сопротивления в схеме замещения, найденные экспериментально при опыте холостого хода, можно использовать при напряжении, близком к тому, при котором они найдены, так как они зависят от насыщения.

Опыт короткого замыкания. Опыт проводится при пониженном напряжении, приложенном к первичной обмотке, и замкнутой накоротко вторичной обмотке (см. рис. 2.12). При этом $\dot{U}_2 = 0$, а токи примерно равны $\dot{I}_{\text{ном}}$. Уравнения трансформатора при коротком замыкании:

$$\dot{U} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \quad (2.46)$$

$$0 = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2'; \quad (2.47)$$

$$\dot{I} = -\dot{I}_2. \quad (2.48)$$

Так как намагничивающий ток \dot{I}_0 при пониженном напряжении небольшой, в опыте короткого замыкания можно считать, что $\dot{I}_0 = 0$, откуда следует, что $\dot{I} = -\dot{I}_2'$.

Характеристики короткого замыкания показаны на рис. 2.14. В опыте короткого замыкания трансформатор ненасыщен, поэтому ток I_K при увеличении напряжения изменяется по линейному закону. Потери при коротком замыкании пропорциональны квадрату тока. Коэффициент мощности $\cos \varphi_K$ остается постоянным при изменении напряжения, так как соотношение между активной и реактивной составляющими остается практически неизменным.

Из опыта короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{m U_K I_K}; \quad (2.49)$$

$$z_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad r_K = z_K \cos \varphi_K;$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (2.50)$$

При проведении опыта следует иметь в виду, что по обмоткам трансформатора протекают номинальные токи, которые из-за нагрева обмоток могут изменяться. При проведении

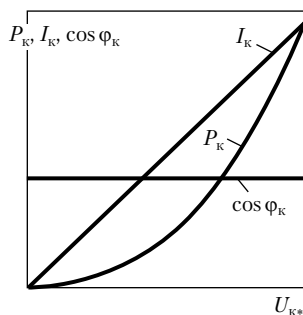


Рис. 2.14. Характеристики короткого замыкания трансформатора ($P = 100 \text{ кВт}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $U = 6,3/0,22 \text{ кВ}$)

опыта сопротивления обмоток следует привести к температуре 75°C.

Потери при коротком замыкании — это потери в меди. Потерями в стали можно пренебречь, так как опыт проводится при напряжении в 10—20 раз меньшем, чем номинальное, а потери в стали пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому потери в стали в опыте короткого замыкания в 100—400 раз меньше, чем при $U_{\text{ном}}$.

Потери короткого замыкания можно найти по формуле

$$P_{\text{к}} = mU_{\text{к}}I_{\text{к}}\cos\varphi_{\text{к}} = mI_{\text{к}}^2r_{\text{к}}, \quad (2.51)$$

где $r_{\text{к}} = r_1 + r'_2$.

В теории трансформаторов важное значение имеет понятие о напряжении короткого замыкания. Напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}$ — это такое напряжение, при котором в опыте короткого замыкания в обмотках трансформатора протекают номинальные токи.

Напряжение короткого замыкания определяется по следующей формуле:

$$u_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к, ном}}}{U_{1 \text{ ном}}} 100\%, \quad (2.52)$$

где $U_{\text{к, ном}} = I_{1 \text{ ном}}z_{\text{к}}$, а $z_{\text{к}}$ — сопротивление короткого замыкания при температуре 75°C.

Напряжение короткого замыкания для силовых трансформаторов определяется ГОСТ 14209—97, выбивается на паспортной табличке трансформатора и определяет объем меди трансформатора, так как от сечения витков обмотки зависит активное сопротивление $r_{\text{к}}$. Поэтому чем больше $u_{\text{к}}$, тем меньше габариты трансформатора. При этом выше потери в меди и ниже КПД. Число витков фазы трансформатора зависит от напряжения и сечения стержня трансформатора, так как номинальное значение индукции для данного сорта стали при проектировании трансформаторов не варьируется в широком диапазоне. Напряжение короткого замыкания определяет значение ударных токов при коротком замыкании трансформатора при номинальном напряжении. На параллельную работу включаются трансформаторы, имеющие одинаковое $u_{\text{к}}\%$.

Зная $u_{\text{к}}\%$, можно определить установившийся ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$. Считая характеристику намагничивания трансформатора линейной, в относительных единицах можно записать

$$I_{k^*} = \frac{100\%}{u_{\%}}. \quad (2.53)$$

Обычно $u_{\text{к}}\%$ для силовых трансформаторов равно $4-12\%U_{\text{ном}}$. Зная $u_{\text{к}}\%$, по формуле (2.53) можно определить установившийся ток короткого замыкания. Если $u_{\text{к}}\% = 10\%$, то $I_{\text{к}}$ при номинальном напряжении равен $10I_{\text{ном}}$.

Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании в соответствии с уравнениями (2.46)–(2.48) представлена на рис. 2.15. Из векторной диаграммы следует, что

$$\begin{aligned} z_K &= r_K + jx_K; \quad r_K = r_1 + r'_2; \\ x_K &= x_1 + x'_2; \quad \dot{I}_1 \approx \dot{I}_2. \end{aligned}$$

Перестроив векторную диаграмму при коротком замыкании так, как показано на рис. 2.16, можно получить треугольник короткого замыкания ABC . В этом треугольнике $AB = u_{\kappa}\%$. Катет $AC = u_{a.\kappa}$, а катет $BC = u_{p.\kappa}$.

Активная составляющая напряжения короткого замыка-

$$u_{a.k} = \frac{I_{1\text{HOM}} r_k}{U_{1\text{HOM}}} 100\%.$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замы-

$$u_{\text{p.k}} = \frac{I_{1\text{HOM}} x_{\text{K}}}{U_{1\text{HOM}}} 100\%.$$

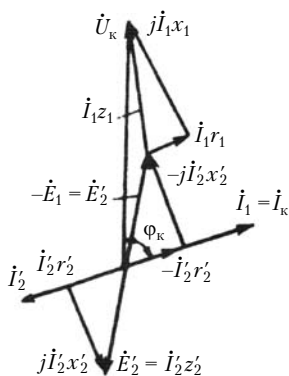


Рис. 2.15. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

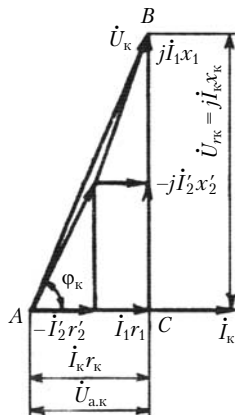


Рис. 2.16. Треугольник короткого замыкания трансформатора

Из треугольника короткого замыкания

$$u_{a,к} = u_k \cos \varphi_k; \quad u_{p,к} = u_k \sin \varphi_k.$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi_k$ в мощных трансформаторах равен примерно 0,1, а в трансформаторах небольшой мощности — примерно 0,5–0,6.

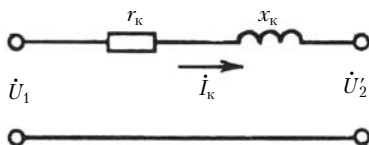


Рис. 2.17. Упрощенная схема замещения трансформатора

простейшей. Схема замещения трансформатора в виде одного сопротивления z_k применяется при анализе поведения трансформаторов в энергетической системе, когда приходится учитывать несколько элементов энергетической системы.

Определение параметров схемы замещения расчетным путем. Активные сопротивления обмоток трансформатора определяются по формуле

$$r = \frac{\rho l}{S}, \quad (2.54)$$

где ρ — удельное сопротивление материала обмотки, Ом·м; l — длина обмотки, м; S — сечение проводника обмотки, м².

При проектировании трансформаторов сначала рассчитывают потери короткого замыкания, а затем определяют активные сопротивления первичной и вторичной обмоток. Так как потери в меди $P_m = I^2 r$, то, заменяя ток через плотность тока и сечение проводника, получаем

$$P_m = \Delta^2 S^2 \frac{\rho l}{S} = \Delta^2 S l \rho, \quad (2.55)$$

где Δ — плотность тока, А/м²; $S l$ — объем провода, м³.

Умножив и разделив правую часть выражения (2.55) на плотность меди γ_m , получим потери в меди:

$$P_m = \frac{\Delta^2 S l \gamma_m \rho}{\gamma_m}. \quad (2.56)$$

Подставив в формулу (2.56) $\gamma_m = 8,9 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\rho = 0,02135 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, получим

Уравнениям (2.46)–(2.48), описывающим поведение трансформатора при коротком замыкании, соответствует схема замещения (рис. 2.17). Эта схема замещения, полученная при допущении $I_0 = 0$, является

$$P_M = 2,4\Delta^2 G_M \cdot 10^{-12}, \quad (2.57)$$

где G_M — масса меди обмотки, кг, $G_M = Sl\gamma_M$, здесь S — сечение обмотки; l — средняя длина витка обмотки.

Число витков на фазу обмотки низкого напряжения

$$w_1 = \frac{U_\Phi}{4,44fB_{\text{ст}}S_{\text{ст}}}, \quad (2.58)$$

где U_Φ — фазное напряжение обмотки низкого напряжения, В; f — частота, Гц; $B_{\text{ст}}$ — индукция в стержне, Тл; $S_{\text{ст}}$ — сечение стержня, м².

Полученное число витков w_1 из формулы (2.58) округляется до целого числа. Следует отметить, что ЭДС одного витка

$$U_B = \frac{U_\Phi}{w_1}$$

в низковольтных трансформаторах равна $1 \div 1,5$ В.

Число витков вторичной обмотки можно определить, зная коэффициент трансформации. Однако при практических расчетах определяют общую массу обмоток и потери в обмотках, а затем находят $r_K = r_1 + r'_2$.

Для алюминиевых обмоток ($\rho_{75^\circ} = 34 \cdot 10^{-9}$ Ом·м, $\gamma = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³) потери

$$P_{\text{ал}} = 12,75\Delta^2 G_{\text{ал}} \cdot 10^{-12}, \quad (2.59)$$

где $G_{\text{ал}}$ — масса алюминиевой обмотки.

Активное сопротивление обмоток увеличивается примерно на 5% за счет влияния вихревых токов.

Раздельное определение индуктивных сопротивлений рассеяния x_1 и x'_2 представляет большие трудности, а для проектирования трансформаторов достаточно рассчитать $x_K = \omega L_K = x_1 + x'_2$. При этом считают, что $x_1 \approx x'_2$.

Определение x_K расчетным путем было проведено В. Роговским в начале XX в. и развито Е. Г. Марквардтом и Г. Н. Петровым.

Для определения x_K необходимо рассчитать энергию поля рассеяния. Пусть в концентрической обмотке (рис. 2.18) протекают токи $i_1 = -i_2 = i_K$ и линейная нагрузка распределена равномерно. Тогда энергия поля рассеяния

$$A_\sigma = \frac{i_K^2 L_\sigma}{2}. \quad (2.60)$$

Из формулы (2.60) индуктивность рассеяния

$$L_\sigma = \frac{2L_\sigma}{i_K^2}. \quad (2.61)$$

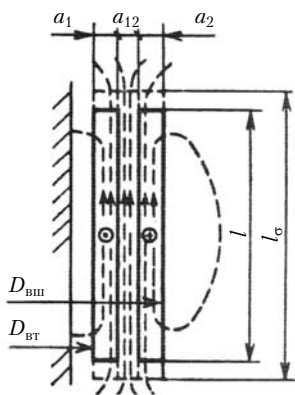


Рис. 2.18. К определению энергии поля рассеяния

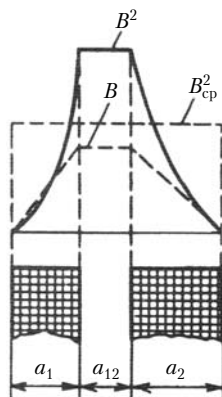


Рис. 2.19. Распределение поля рассеяния в радиальном направлении

Считая, что индукционные линии поля рассеяния параллельны и замыкаются равномерно вокруг оси стержня, распределение поля рассеяния в радиальном направлении можно принять трапецеидальным (рис. 2.19). Энергию поля рассеяния можно найти также по формуле

$$A_{\sigma} = \frac{1}{2\mu_0} \int B^2 dV_{\sigma} = \frac{B_{cp}^2 V_{\sigma}}{2\mu_0}, \quad (2.62)$$

где B_{cp} — среднее значение индукции в объеме поля рассеяния; V_{σ} — объем поля рассеяния (см. рис. 2.18).

Объем поля рассеяния V_{σ} представляет собой объем полого цилиндра с расчетной высотой l_{σ} . Расчетная высота полого цилиндра несколько больше высоты обмотки l (см. рис. 2.18):

$$l_{\sigma} = \frac{1}{k_R} l, \quad (2.63)$$

где k_R — коэффициент Роговского, который учитывает увеличение высоты обмотки, $k_R \approx 0,93 \div 0,98$. Как показали исследования В. Роговского,

$$l_{\sigma} \approx \frac{l}{1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma})}, \quad (2.64)$$

где $\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi l}$.

В концентрических обмотках $\sigma < 0,1$ и

$$l_{\sigma} \approx \frac{l}{1 - \sigma} \approx l(1 + \sigma) = l + \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi}.$$

Объем поля рассеяния

$$V_{\sigma} = \pi l_{\sigma} \left(\frac{D_{\text{вн}}^2 - D_{\text{вт}}^2}{4} \right) = 2\pi l_{\sigma} S R_{\text{ср}} = 2\pi l_{\sigma} \delta R_{\text{ср}},$$

где $S = \frac{D_{\text{вт}}}{2} - \frac{D_{\text{вн}}}{2} = a_1 + a_2 + a_{12}$; $R_{\text{ср}} = \frac{D}{2}$ — средний радиус.

Тогда

$$V_{\sigma} = \pi D_{\text{ср}} (a_1 + a_2 + a_{12}) l_{\sigma}. \quad (2.65)$$

Из рис. 2.19 следует, что

$$B_{\text{ср}}^2 = B^2 \frac{a_{12} + (a_1 + a_2)/3}{a_{12} + a_1 + a_2}. \quad (2.66)$$

Так как энергия поля рассеяния сосредоточена в объеме поля рассеяния, из закона полного тока

$$I_{\text{к}} w = \frac{B l_{\sigma}}{\mu_0} \quad (2.67)$$

следует

$$B = \frac{\mu_0 I_{\text{к}} w}{l_{\sigma}}. \quad (2.68)$$

Тогда из формул (2.61) и (2.62) после подстановки выражений (2.66) и (2.68)

$$l_{\sigma} = \frac{\mu_0 \pi D_{\text{ср}} w^2}{l_{\sigma}} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right). \quad (2.69)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = 2\pi f L_{\sigma} = \frac{7,9 f w^2 \pi D_{\text{ср}}}{l_{\sigma}} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) 10^{-6}; \quad (2.70)$$

здесь все размеры выражены в метрах.

Расчет L_{σ} рассмотренным выше способом не всегда применим. Возникают трудности, если обмотки располагаются на ферромагнитном стержне со сдвигом относительно друг друга или произвольно в пространстве.

Общим методом определения $x_{\text{к}}$ является метод средних геометрических расстояний, который предложил К. Максвелл.

Определим среднее геометрическое расстояние g между точкой k и сечением S , которые лежат в одной плоскости

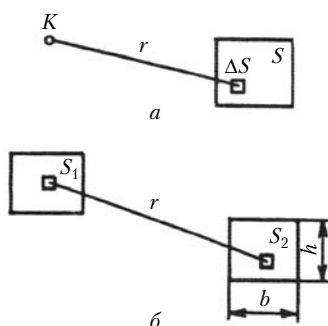


Рис. 2.20. Среднее геометрическое расстояние между точкой и сечением

(рис. 2.20, а). Разбив сечение S на m элементарных площадок и определив до каждой площадки расстояние, найдем среднее геометрическое расстояние:

$$g = \sqrt[m]{r_1 r_2 r_3 \dots r_m} \quad (2.71)$$

или

$$\ln g = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \ln r_k. \quad (2.72)$$

При $m \rightarrow \infty$ выражение (2.72) принимает вид

$$\ln g = \frac{1}{S} \int_S \ln r dS. \quad (2.73)$$

Логарифм среднего геометрического расстояния между сечениями S_1 и S_2 (рис. 2.20, б)

$$\ln g = \frac{1}{S_1 S_2} \iint_{S_1 S_2} \ln r dS_1 dS_2. \quad (2.74)$$

Если сечения S_1 и S_2 являются сечениями обмоток, размещенных на одном стержне трансформатора, то L_σ определяется по формуле

$$L_\sigma = \frac{\mu_0}{2\pi} w^2 \ln \frac{g_{12}^2}{g_1 g_2}, \quad (2.75)$$

где g_{12} — среднее геометрическое расстояние между сечениями S_1 и S_2 ; g_1 и g_2 — средние геометрические расстояния сечений S_1 и S_2 от самих себя.

Расстояния g_1 и g_2 получаются, если передвигать dS_1 и dS_2 соответственно по сечениям S_1 и S_2 .

Как показали исследования, среднее геометрическое расстояние сечения от самого себя может быть найдено по формуле

$$g = k(b + h), \quad (2.76)$$

где $k = 0,223$ и только четвертый знак в k зависит от отношения b/h .

Если считать поле рассеяния плоскопараллельным, метод средних геометрических расстояний позволяет решить

многие задачи, связанные с определением индуктивных сопротивлений рассеяния.

Для определения активной и реактивной составляющих сопротивления взаимной индукции $z_{12} = z_{12} + jx_{12}$ необходимо знать активную I_{0a} и реактивную I_{0p} составляющие тока холостого хода. Тогда активное r_{12} и реактивное x_{12} сопротивления ветви намагничивания по рис. 2.6 будут

$$r_{12} = \frac{E_1}{I_{0a}}; \quad (2.77)$$

$$x_{12} = \frac{E_1}{I_{0p}}. \quad (2.78)$$

Для определения I_{0a} предварительно рассчитывают потери в стали трансформатора $\sum p_m G_m$, зная массу ярм и стержней и удельные потери при заданной индукции:

$$I_{0a} = \frac{\sum p_m G_m}{mE_1}, \quad (2.79)$$

где p_m — удельные потери при данной индукции, Вт/кг; G_m — масса участка магнитной цепи, для которой принимаются удельные потери.

Для вычисления реактивной составляющей I_{0p} тока холостого хода необходимо предварительно определить реактивную намагничивающую мощность $\sum p_p G_m$, а затем ток:

$$I_{0p} = \frac{\sum p_p G_m}{mE}, \quad (2.80)$$

где p_p — удельная намагничивающая мощность, В·А/кг.

Значения удельных потерь p_m и удельной намагничивающей мощности p_p находят по соответствующим таблицам в зависимости от индукции каждого участка магнитопровода.

Если выразить параметры и потери трансформаторов в относительных единицах, то можно отметить, что они изменяются для трансформаторов в небольшом диапазоне, хотя мощности и действительные значения токов, потерь и сопротивлений изменяются на несколько порядков. Так, для трехфазных силовых трансформаторов от 25 до 50 000 кВ·А

$$I_{0*} = 0,03 \div 0,003; \quad P_{c*} = P_{0*} = 0,005 \div 0,0006;$$

$$P_{\Sigma 1*} = P_{\Sigma 2*} = P_{K*} = 0,025 \div 0,0025; \quad x_{\Sigma 1*} = x_{\Sigma 2*} = 0,03 \div 0,07;$$

$$z_{0*} = x_{0*} = 33 \div 330; \quad r_{1*} = r_{2*} = 0,0125 \div 0,00125; \quad r_{0*} = 5,5 \div 65.$$

Здесь более мощным трансформаторам соответствуют меньшие значения активных сопротивлений и большие значения индуктивных сопротивлений. При применении относительных единиц штрихи у приведенных вторичных величин не ставятся.

В относительных единицах активные сопротивления выражают соответственно потери в стали и потери в меди:

$$r_{12*} = \frac{r_{12}}{z_{\text{н}}} = \frac{P_{\text{ст}} I_{1\text{ном}}}{3 I_0^2 U_{1\text{ном}}} = \frac{P_{\text{ст}}}{3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}} \left(\frac{I_{1\text{ном}}}{I_0} \right)^2 = \frac{P_{\text{ст}*}}{I_0*};$$

$$r_{1*} = \frac{r_1}{z_{\text{н}}} = \frac{3 r_1 I_{1\text{ном}}^2}{3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}} = \frac{P_{\text{э}1}}{S_{1\text{н}}} = P_{\text{э}1*};$$

$$r_{2*} = \frac{r'_2}{z_{\text{н}}} = \frac{3 r'_2 I_{1\text{ном}}^2}{3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}} = \frac{P_{\text{э}2}}{S_{1\text{н}}} = P_{\text{э}2*}.$$

2.7. Конструкции трансформаторов

Конструктивное исполнение трансформатора зависит от его назначения и области применения. Однако почти все трансформаторы имеют одни и те же главные конструктивные элементы — магнитную систему и обмотки. Наиболее широко применяются силовые трансформаторы, которые служат для передачи электрической энергии и распределения ее между потребителями.

Активная часть (обмотки с магнитной системой) силового трансформатора общего назначения, как правило, погружена в бак с трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называют *маслонаполненными* или *масляными*. Трансформаторное масло, омывая обмотки и магнитопровод, улучшает электрическую изоляцию токоведущих частей и обеспечивает лучшие условия охлаждения трансформатора.

Работающие на воздухе трансформаторы, активная часть которых не погружена в масло, называют *сухими*. Сухие трансформаторы предназначены для установки в закрытых помещениях с относительной влажностью не выше 80%.

Обмотки трансформатора состоят из медных или алюминиевых проводников и изоляционных деталей. Конструкция обмоток должна обеспечивать динамическую стойкость при механических воздействиях в процессе изготовления и эксплуатации.

Электрическая прочность изоляции обмоток должна обеспечивать надежную работу трансформатора при номинальных условиях, а также при перенапряжениях и кратковременных повышениях напряжения, возникающих в энергосистемах при коммутации и грозовых явлениях. Конструкция обмоток должна обеспечивать хороший отвод тепла, чтобы температура обмоток не превышала значения, установленного ГОСТ 8865—93 для данного класса изоляции. При изготовлении обмотки должны быть технологичными, т.е. простыми в изготовлении и надежными в эксплуатации. Производство обмоток является материалоемким, а трудоемкость обмоточно-изоляционных работ составляет 25—30% общей трудоемкости изготовления трансформатора и повышается с ростом напряжения. Обмотки трансформатора выполняются из медных или алюминиевых обмоточных проводов.

Конструкция обмоток включает в себя изоляционные детали, образующие главную и продольную изоляцию, выводные концы, регулировочные ответвления, емкостные кольца и экраны, а также приспособления для осевой стяжки обмоток.

Плотность тока в обмотках выбирают по условиям нагрева в пределах $(1 \div 2,5) \cdot 10^6$ А/м² в сухих и $(2 \div 4,5) \cdot 10^6$ А/м² в масляных в зависимости от мощности и конструктивного выполнения трансформатора. По условиям технологии максимальное сечение круглого проводника выбирается примерно до 20 мм², а прямоугольного — 80 мм². Предельный ток одного проводника — соответственно 45 и 360 А.

Основным элементом обмотки является виток, который выполняется одним или группой параллельных проводов. Ряд витков на цилиндрической поверхности называется слоем. Витки могут группироваться в катушки. По направлению намотки обмотки делятся на правые и левые подобно резьбе винта. Большинство обмоток трансформаторов выполняется с левой намоткой для удобства изготовления.

Определяющими для конструкции обмотки являются число витков, сечение витка и класс напряжения.

По способу размещения обмоток на стержне различают обмотки концентрические и дисковые или чередующиеся (рис. 2.21).

По конструктивно-технологическим признакам обмотки делятся на следующие основные типы: цилиндрические, винтовые и непрерывные. Обмотки каждого из этих типов могут подразделяться на одно- или многослойные цилинд-

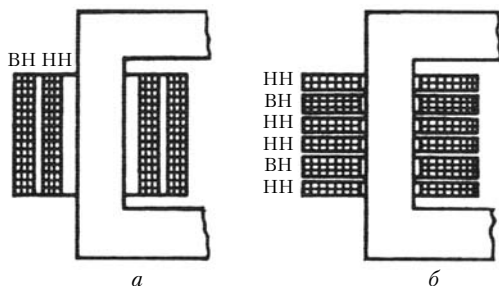


Рис. 2.21. Типы обмоток:

a — концентрические; *б* — дисковые или чередующиеся; НН — обмотки низкого напряжения; ВН — обмотки высокого напряжения

рические, одно- или многоходовые винтовые, дисковые, переплетенные. В мощных трансформаторах, предназначенных для питания электропечей, применяют обмотки из листовой меди или алюминия, а также кованые катушки, выполненные из шинной меди или алюминия.

Цилиндрические слоевые обмотки выполняются из проводов прямоугольного или круглого сечения (рис. 2.22). Слои обмотки составляют витки, наматываемые по винтовой линии. При намотке каждый виток слоя укладывают вплотную к предыдущему витку в направлении высоты обмотки. Переход из слоя в слой осуществляется в процессе намотки без пайки. Витки состоят из одного или нескольких параллельных проводов, располагаемых обычно рядом в осевом направлении.

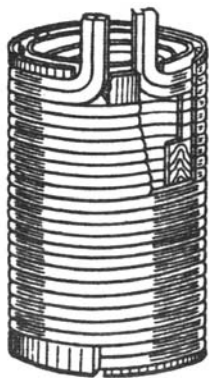


Рис. 2.22. Цилиндрическая двухслойная обмотка

Однослойными и двухслойными обычно выполняют обмотки низшего напряжения на напряжение до 690 В в трансформаторах мощностью до 630 кВ·А.

Многослойные цилиндрические обмотки применяют главным образом в качестве обмоток высшего напряжения (до 35 кВ).

В последнее время широкое применение получили многослойные цилиндрические обмотки из прямоугольного провода. Применение этих обмоток при использовании специальных экранов позволяет обеспечить равномерное распределение электрического поля в трансформаторе при перенапряжениях.

Катушечная многослойная цилиндрическая обмотка состоит из ряда последовательно соединенных многослойных катушек (рис. 2.23). Такое разделение необходимо для уменьшения напряжения между слоями. Обычно катушечные обмотки выполняют в виде последовательно соединенных парных (двойных) катушек.

Дисковые катушечные обмотки состоят из ряда одинарных или двойных катушек (рис. 2.24). Число витков в одной катушке достигает 20—25, число параллельных проводников в витке — до 8. Витки

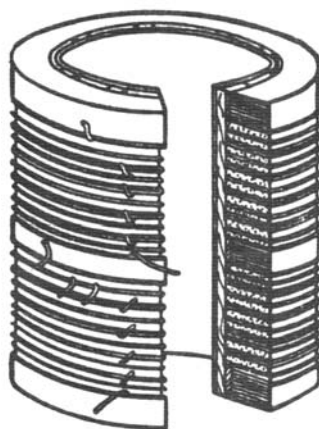


Рис. 2.23. Катушечная многослойная цилиндрическая обмотка

катушки намотаны один на другой по спирали в радиальном направлении. Намотанные катушки собирают на шаблоне и соединяют пайкой. Осевые и радиальные каналы образуются П-образными замковыми прокладками. Такие обмотки широко применяются в высоковольтных трансформаторах в качестве входных катушек.

Непрерывная обмотка состоит из ряда катушек, расположенных в осевом направлении и соединенных между собой последовательно без пайки. Число катушек в обмотке — от 30 до 150. Витки в катушке наматываются плашмя по спирали в радиальном направлении. Катушки наматываются на рейках, образующих вертикальные каналы. На рейки надеваются прокладки, создающие радиальные каналы между катушками.

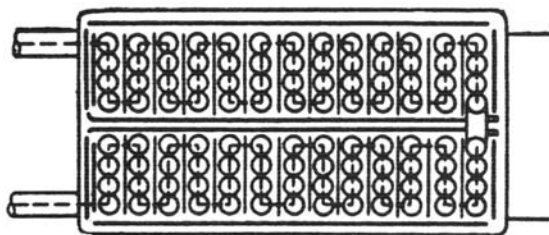


Рис. 2.24. Дисковая катушка чередующейся обмотки из круглого провода

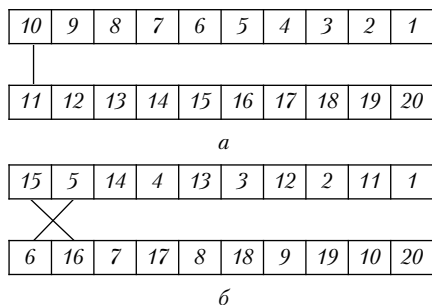


Рис. 2.25. Расположение витков в непрерывных (а) и в переплетенных (б) обмотках

Каждый виток обмотки может состоять из одного или нескольких параллельных проводов. Путем перестановки (транспозиции) параллельных проводов на переходах из катушки в катушку обеспечивается выравнивание их активного и индуктивного сопротивлений.

Непрерывность намотки достигается перекладыванием витков в катушках (рис. 2.25, а). Переходы осуществляются на уровне крайнего внутреннего или наружного витка изгибом провода на ребро.

Переплетенная обмотка отличается от непрерывной последовательностью расположения витков в обмотке (рис. 2.25, б). Если в непрерывных обмотках последовательность витков 1, 2, 3, ... n , то для переплетенных 1 ($n/2 + 1$); 2 ($n/2 + 2$); 3 ($n/2 + 3$); ... m ($n/2 + m$), где n — число витков в паре катушек; m — порядковый номер витка.

В переплетенной обмотке разность напряжений между соседними витками в $n/2$ раз больше, чем у непрерывной. При этом снижается напряжение между соседними катушками, что позволяет отказаться от экранирующих витков и дополнительной изоляции отдельных катушек. Переплетенные обмотки находят широкое применение в мощных трансформаторах на напряжения 110–1200 кВ.

Винтовая обмотка (рис. 2.26) состоит из ряда витков, наматываемых по винтовой линии. В трансформаторах большой мощности число параллельных проводников может достигать многих десятков. Винтовые обмотки бывают одно-, двух- и многоходовыми. Двухходовые и многоходовые обмотки состоят соответственно из двух или более отдельных винтовых обмоток, вмотанных одна в другую. Каналы для охлаждения образуются так же, как и в непрерывной обмотке.

Если витки, соединенные параллельно, находятся на различных расстояниях от стержня, то они сцеплены с различными потоками рассеяния и в них наводятся разные ЭДС. Параллельные проводники будут иметь различные индуктивные сопротивления, и токи будут распределяться неравномерно. Чтобы обеспечить равномерное распределение токов в параллельных ветвях обмотки, необходимо сделать одинаковыми или близкими друг

другу сопротивления параллельных ветвей обмотки. Для этого выполняется транспозиция параллельных проводников, образующих виток обмотки. При полной транспозиции каждый проводник занимает поочередно все положения, возможные в пределах одного витка. При частичной транспозиции перекладка осуществляется в нескольких местах, и сопротивления выравниваются (рис. 2.27).

В трансформаторах и автотрансформаторах большой мощности широко применяются транспонированные провода, которые снижают трудоемкость обмоточных работ. Транспонированные провода состоят из параллельных транспонированных проводников, изолированных один от другого эмалевой пленкой и имеющих общую изоляцию из кабельной бумаги.

В последнее время в качестве проводникового материала для обмоток применяется алюминиевая фольга (лента). Удель-

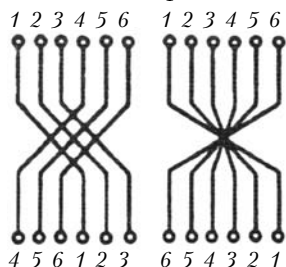


Рис. 2.27. Схемы частичной транспозиции

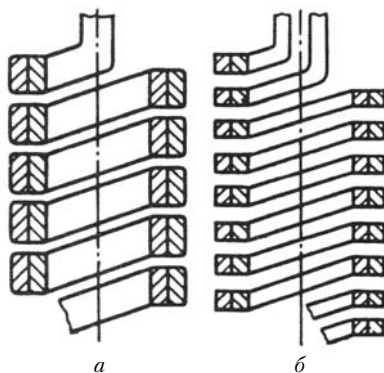


Рис. 2.26. Винтовые обмотки:

а — одноходовая; *б* — двухходовая

ное сопротивление алюминиевого провода на 64% больше, чем медного. Однако применение алюминиевой фольги позволяет уменьшить габариты обмоток за счет улучшения охлаждения обмотки, что достигается равномерным распределением температуры по сечению катушки. При этом обеспечивается также возможность механизации процесса намотки обмоток.

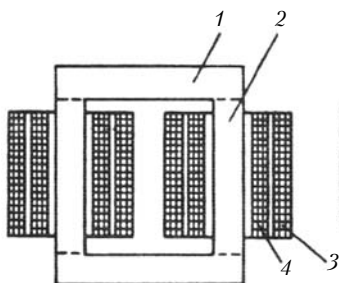


Рис. 2.28. Однофазный трансформатор стержневой конструкции

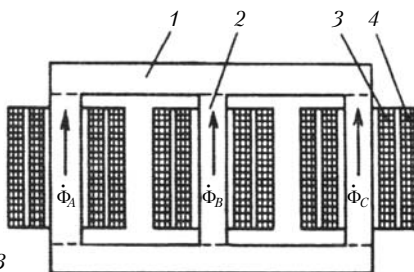


Рис. 2.29. Трехфазный трансформатор стержневой конструкции

Конструкции магнитных систем трансформаторов можно разделить на два основных типа: *стержневые* и *броневые*.

Для силовых трансформаторов применяют преимущественно магнитные системы стержневого типа. Однофазные стержневые трансформаторы имеют два стержня 2, несущие обмотки 3, 4, а трехфазные — три стержня. Стержни соединяются верхним и нижним ярмами 1 (рис. 2.28 и 2.29).

Однофазный броневой трансформатор имеет один стержень 2 и два ярма 1, закрывающие (бронирующие) обмотки (рис. 2.30).

Трехфазный броневой трансформатор получается из трех однофазных, если их поставить друг на друга (рис. 2.31). При такой конструкции потоки в ярмах равны половине потока в стержнях. Силовые броневые трансформаторы из-за более сложной технологии в России не изготавливаются.

В силовых трансформаторах мощностью свыше 100 МВ·А и напряжениями 220 кВ и выше применяют бронестержневую или многостержневую конструкцию (рис. 2.32). Эта конструкция получается из стержневой, если добавить

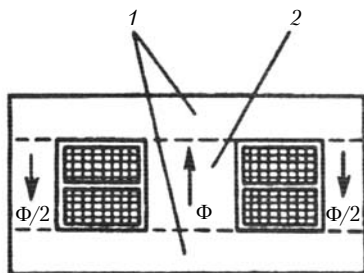


Рис. 2.30. Однофазный трансформатор броневой конструкции

два стержня, закрывающих обмотки двух фаз, расположенных на крайних стержнях трехфазного стержневого трансформатора (см. рис. 2.29). По сравнению со стержневыми бронестержневые трансформаторы имеют меньшую высоту магнитопроводов, что

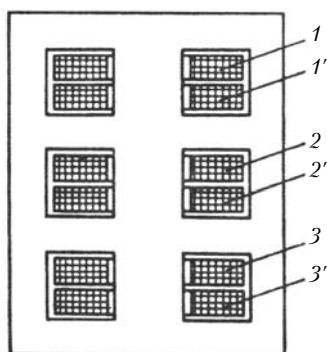


Рис. 2.31. Броневой трехфазный трансформатор:

1, 2, 3 — обмотки низшего напряжения фаз А, В, С; 1', 2', 3' — обмотки высшего напряжения фаз А, В, С

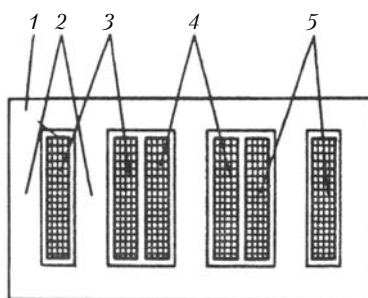


Рис. 2.32. Трехфазный бронестержневой трансформатор:

1 — ярма; 2 — стержни; 3, 4, 5 — обмотки фаз низшего и высшего напряжений А, В, С

очень важно при транспортировке, так как позволяет им лучше вписаться в железнодорожные габариты.

По взаимному расположению стержней и ярм магнитные системы могут иметь *плоское* и *пространственное* выполнения (см. рис. 2.9).

В качестве материала магнитной системы используется главным образом холоднокатаная текстурованная электротехническая сталь марок 3413, 3404, 3405, 3406, которая поставляется на заводы в рулонах. Толщина стали 0,3; 0,35; 0,5 мм. Сталь толщиной 0,3 и 0,35 мм имеет электроизоляционное нагревостойкое покрытие, а сталь толщиной 0,5 мм не имеет электроизоляционного покрытия. Применение этой стали позволило повысить магнитную индукцию в магнитопроводах силовых трансформаторов до 1,7—1,8 Тл при одновременном уменьшении массы, потерь и тока холостого хода.

По способу соединения стержней с ярмами магнитные системы делятся на *стыковые*, *шихтованные* и *навитые*.

В стыковых конструкциях (рис. 2.33) стержни и ярма собираются отдельно и крепятся друг с другом стяжными шпильками. В месте

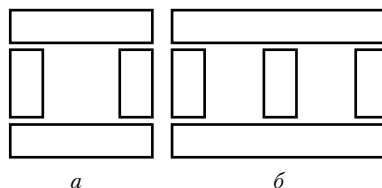


Рис. 2.33. Магнитопроводы со стыковыми соединениями:

а — однофазный; б — трехфазный

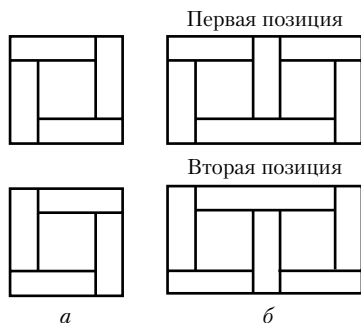


Рис. 2.34. Схемы укладки листов стали в шихтованных магнитопроводах:

а — однофазном; *б* — трехфазном

и ярма не являются отдельными элементами, а их пластины переплетаются (шихтуются) в смежных слоях. Магнитная система собирается из отдельных слоев, каждый из которых состоит из одной или нескольких пластин, уложенных в слое встык.

По форме стыка шихтованные магнитные системы могут выполняться с *прямым* и *косым* стыками, что необходимо для уменьшения длины участков магнитной цепи, на которых направление магнитного потока не совпадает с направлением прокатки электротехнической стали. Уменьшение зоны повышенных потерь и намагничивающей мощности в углах магнитной системы с косым стыком (рис. 2.35) позволяет снизить потери и ток холостого хода.

Форма поперечного сечения стержня определяется формой обмотки. Так как обмотки силовых трансформаторов имеют цилиндрическую форму, поперечное сечение стержня стремятся приблизить к кругу. Из-за сложности набора круглого сечения стержень выполняют ступенчатой формы, набирая каждую ступень из пластин одинаковой ширины (рис. 2.36). С увеличением диаметра стержней d увеличивают число ступеней, число которых в мощных трансформаторах достигает 15 и более. Чем больше ступеней, тем больше в стержне пакетов, тем больше типоразмеров листов стали, необходимых для изготовления магнитопровода трансформатора. Сечение стержня трансформатора оп-

стыков ставятся изоляционные прокладки, которые устраняют замыкание листов стали стержней и ярм. Немагнитные зазоры при стыковой конструкции увеличивают магнитное сопротивление, что приводит к увеличению тока холостого хода. Поэтому стыковые соединения применяются редко, хотя стыковые конструкции менее трудоемки.

В шихтованных конструкциях (рис. 2.34) стержни



Рис. 2.35. Косой стык

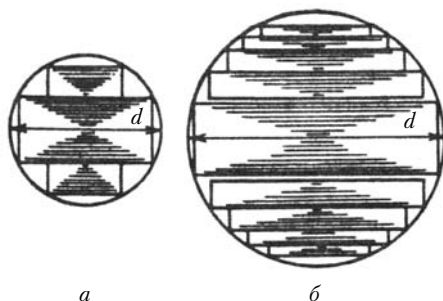


Рис. 2.36. Сечение стержней магнитопровода трансформатора:

a — из пластин двух профилей; *б* — из пяти профилей

ределяет диаметр обмотки $D_{\text{в}}$, поэтому необходимо стремиться к лучшему заполнению сечения стержня сталью. Использование сечения характеризуется коэффициентом использования

$$k_{\text{и}} = \frac{S_{\text{ст}}}{\pi D_{\text{вт}}^2 / 4}, \quad (2.81)$$

где $S_{\text{ст}}$ — сечение стали стержня; $D_{\text{вт}}$ — внутренний диаметр наиболее близкой к стержню обмотки (см. рис. 2.36).

Коэффициент использования зависит от числа каналов и ступеней и коэффициента заполнения пакетов сталью, $k_{\text{и}} = 0,65 \div 0,92$. Если число ступеней равно числу листов стали, из которых собран стержень, можно говорить о том, что сечение стержня приближается к площади круга, а $k_{\text{и}} = 0,95 \div 0,96$. В последнее время такие стержни стали изготавливать, используя специальные автоматы для резки стали.

Сечение яра трансформатора для упрощения технологии выполняют с меньшим числом ступеней. Для уменьшения тока холостого хода сечение яра принимают на 10–15% больше сечения стержня.

Стяжка пакетов стержней трансформаторов малой и средней мощностей осуществляется изоляционными цилиндрами, на которых крепится обмотка низшего напряжения. Цилиндр спрессовывает стержень с помощью деревянных или пластмассовых планок и реек. Стяжка стержней в трансформаторах выполняется шпильками, изолированными от стали и не создающими короткозамкнутых контуров. В последнее время широко применяется бандажировка стержней прочной пластмассовой лентой или стеклолентой. Такое крепление снижает трудоемкость изготовления

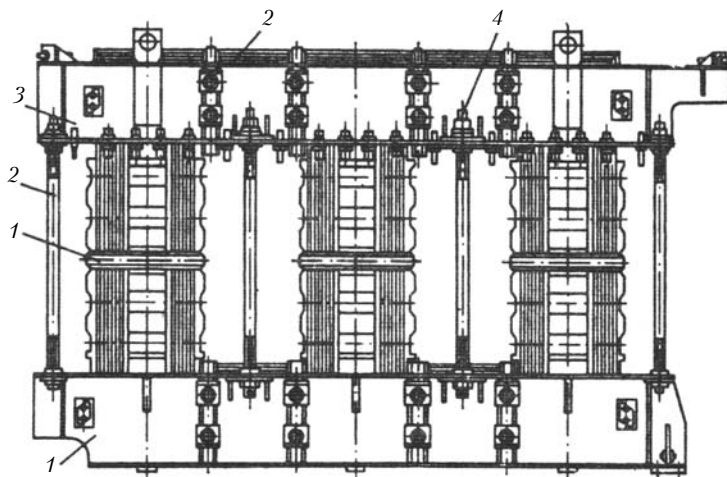


Рис. 2.37. Остов трансформатора

и уменьшает добавочные потери. Стяжка ярма осуществляется деревянными или стальными балками.

Стержни 1 и ярмо 2 вместе с прессующими деталями (3 — балка, 4 — шпилька) образуют остов трансформатора (рис. 2.37).

Шихтованные конструкции при сборке трудоемки, так как сначала собирается магнитопровод, а затем расшихтовывается одно ярмо, надеваются на стержни обмотки и снова зашихтовывается ярмо. Стыковые конструкции проще при сборке, однако ток холостого хода у трансформаторов с такими магнитопроводами больше, чем у бесстыковых конструкций.

Конструкции магнитных систем трансформаторов малой мощности выполняются таким образом, чтобы обеспечить наиболее экономичный и простой способ их изготовления. Одним из распространенных способов изготовления магнитных систем таких трансформаторов является способ машинной навивки из ленточной электротехнической стали или стали специальных сплавов.

Витые сердечники позволяют автоматизировать изготовление трансформаторов, использовать преимущества холоднокатаных сталей. Хотя в навитых сердечниках и нет стыковых соединений, магнитный поток переходит из одного слоя в другой и магнитное сопротивление витого сердечника определяется натягом ленты при намотке. На рис. 2.38, а — z

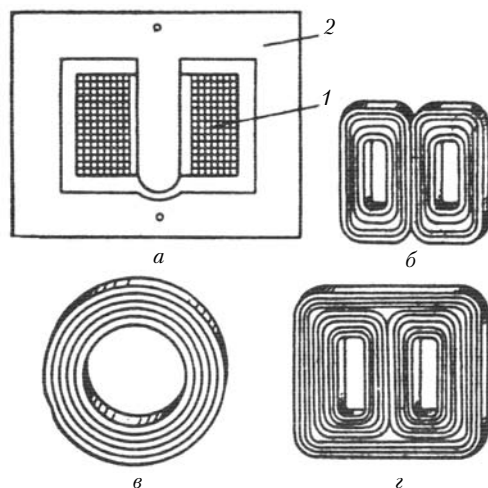


Рис. 2.38. Магнитные системы микротрансформаторов

представлены наиболее распространенные конструкции магнитных систем трансформаторов малой мощности. На рис. 2.38, *а* дана шихтованная конструкция однофазного трансформатора с магнитопроводом 2, имеющим в среднем стержне просечку. Листы стержня отгибаются и вставляются в катушку 1 с обмотками высшего и низшего напряжений. Такая конструкция технологична и находит достаточно широкое применение. На рис. 2.38, *б* — *г* представлены витые сердечники трансформаторов малой мощности (рис. 2.38, *б* и *в* — сердечники однофазных трансформаторов, 2.38, *г* — трехфазного).

Важными элементами конструкции активной части трансформатора являются отводы и вводы. Соединение концов обмоток между собой и с вводами, подключение регулировочных ответвлений к переключателям и другие соединения внутри трансформатора осуществляются с помощью проводников, называемых отводами, которые выполняются в виде шин, прутков или гибкого кабеля. Для вывода концов обмоток и подключения к электрической сети служат вводы — фарфоровые проходные изоляторы, через внутреннюю полость которых проходит токоведущий стержень. Внешняя конфигурация и размеры вводов зависят от класса напряжения, рода установки и тока. Ввод должен обеспечить надежную изоляцию токоведущего стержня от заземленных элементов (рис. 2.39).

Бак трансформатора с масляным охлаждением представляет собой резервуар с маслом, в котором находится активная часть трансформатора. Нагретое при работе трансформатора масло охлаждается через стенки бака и охлаждающие устройства. Форма баков чаще всего овальная — тогда она приближается к форме активной части трансформатора и является наиболее простой и механически прочной.

С изменением электрической нагрузки и температуры окружающего воздуха температура масла в трансформаторе изменяется. Колебания температуры вызывают изменение объема масла в баке. Чтобы бак трансформатора всегда был

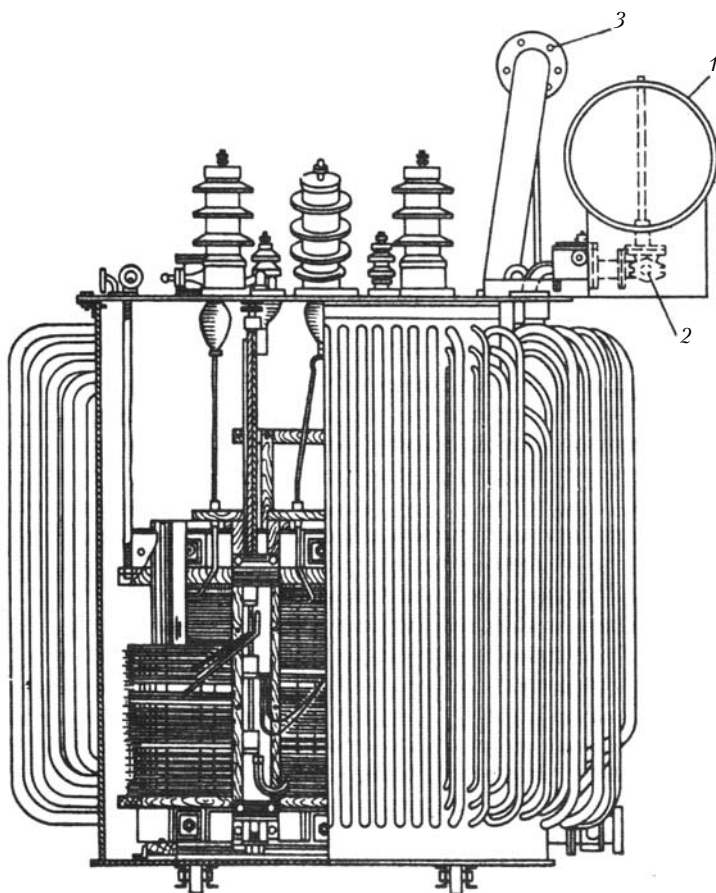


Рис. 2.39. Общий вид трансформатора мощностью 100 кВ·А и напряжением 6 кВ

заполнен маслом, на трансформаторах класса 6 кВ и выше мощностью 25 кВ·А и более устанавливают расширитель.

Расширитель 1 (см. рис. 2.39) представляет собой металлический сосуд, обычно цилиндрической формы, сообщающийся с баком трансформатора. Емкость расширителя должна обеспечивать постоянное наличие в нем масла при всех режимах работы трансформатора. Расширитель предохраняет масло трансформатора от непосредственного соприкосновения с воздухом, что защищает масло от преждевременного окисления. Существуют герметизированные трансформаторы с азотной защитой масла, у которых пространство между зеркалом масла и верхней стенкой расширителя заполнено азотом.

Современный силовой трансформатор снабжен рядом вспомогательных устройств, обеспечивающих его нормальную эксплуатацию и предупреждающих аварии. Эти устройства показаны на рис. 2.39. Между баком и расширителем на соединяющей их трубе устанавливается газовое реле 2, которое срабатывает при всех видах внутренних повреждений в трансформаторе, сопровождающихся выделением газов, при утечке масла и попадании воздуха в бак.

При серьезной аварии, когда отключение трансформатора почему-либо запоздало, в баке может развиваться значительное давление, способное разорвать его. Для предотвращения такой возможности на крышке трансформатора устанавливается выхлопная труба 3, через которую выбрасываются избыточные массы газов и масла. Отверстие выхлопной трубы закрыто стеклянным диском (мембраной), которая лопается при резком повышении давления.

2.8. Схемы и группы соединений

Понятие о схемах и группах соединений имеет важное значение при эксплуатации трансформаторов.

В однофазных трансформаторах начала обмоток обозначаются A, a , а концы X, x . Большие буквы относятся к обмоткам высшего напряжения, а малые — к обмоткам низшего напряжения.

В трехфазных трансформаторах начала обмоток высшего напряжения обозначаются A, B, C , а концы X, Y, Z . Начала обмоток низшего напряжения — a, b, c , а концы — x, y, z . Нулевые точки — O и o . Если есть третья обмотка среднего напряжения, используются обозначения A_m, B_m, C_m и X_m, Y_m, Z_m .

Если на одном стержне намотать правовинтовую и левовинтовую обмотки, а начала и концы принимать у них одинаковыми, то ЭДС катушек будут сдвинуты на 180° . Естественно, при изменении маркировки — перемене обозначений начала и концов обмоток — ЭДС в катушках не изменяются. Чтобы соединить катушки с правой и левой намотками параллельно, надо соединить начала и концы обмоток, т.е. a_1 и x_2 , a_2 и x_1 . При условии равенства витков, когда $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$, токи в катушках будут равны нулю. Если в этом случае соединить начала и концы обмоток, то в обмотках будет протекать ток, определяемый ЭДС, равной $2\dot{E}_1$, и суммой сопротивлений обмоток.

При включении трансформаторов на параллельную работу удобно соединять начала обмоток одного трансформатора с началом обмоток другого и стандартизовать обозначения.

Чтобы не было ошибок при эксплуатации трансформаторов, введено понятие сдвига между напряжениями первичной и вторичной обмоток. Сдвиг фаз между линейными напряжениями обмоток принято характеризовать положением стрелок на циферблате часов. Электродвижущую силу обмотки высшего напряжения совмещают с минутной стрелкой и устанавливают на цифре 12. Часовая (малая) стрелка совмещается с напряжением обмотки низшего напряжения.

Для однофазных трансформаторов возможны две группы соединений: *нулевая* и *шестая* (рис. 2.40). Для нулевой (или двенадцатой) сдвиг между напряжениями равен 0° — минутная и часовая стрелки совпадают (рис. 2.40, а). Для шестой группы сдвиг между напряжениями 180° , стрелки по-

казывают 6 ч (рис. 2.40, б).

Эти группы обозначаются соответственно I/I—0 и I/I—6. Стандартизована и применяется группа 0.

В трехфазных и многофазных трансформаторах возможны большие комбинации обмоток, и поэтому рассматриваются схемы соединения обмоток. Наибольшее при-

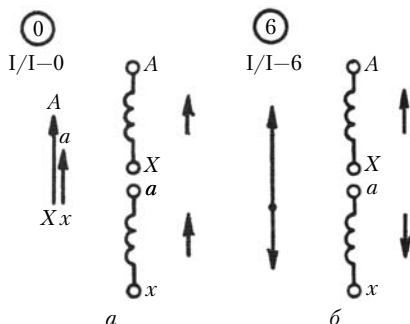


Рис. 2.40. Группы соединений однофазных трансформаторов

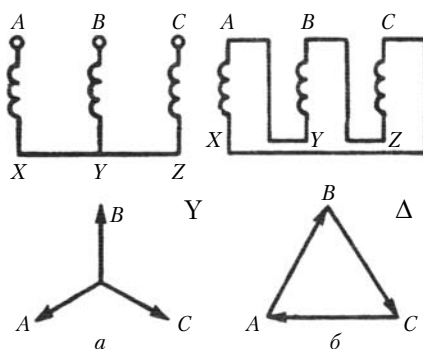


Рис. 2.41. Схемы и векторные диаграммы соединения обмоток:

a — звезда; *б* — треугольник

менение имеют схемы соединения в звезду и треугольник (рис. 2.41).

Схема соединения в зигзаг применяется редко (рис. 2.42), а другие комбинации соединений обмоток практически не применяются.

Схема соединения в звезду обозначается буквой *Y*, соединения в треугольник — Δ , в зигзаг — *Z*.

В соединениях в звезду и зигзаг можно вывести нулевую точку. В этом случае получаются соединения в звезду с нулевой точкой и в зигзаг с нулевой точкой.

Для многофазных трансформаторов остаются эти же принципы соединения обмоток. Например, для пятифазной системы схемами соединения будут пятифазная звезда и пятиугольник (рис. 2.43, *a*, *б*), для *m*-фазной системы — *m*-фазная звезда и *m*-угольник.

В трехфазной системе схемы соединений *Y* и Δ образуют 12 групп соединений со сдвигом фаз линейных напряжений на 30° , что соответствует 12 цифрам циферблата часов.

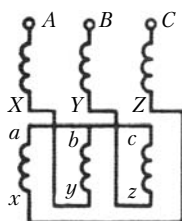


Рис. 2.42. Схема и векторная диаграмма соединения в зигзаг

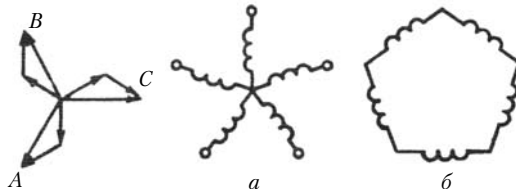


Рис. 2.43. Пятиугольная звезда (*a*), пятиугольник (*б*)

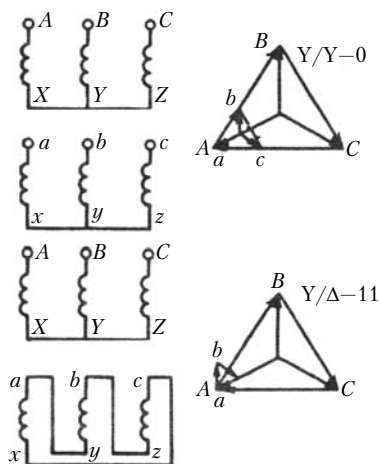


Рис. 2.44. Группы соединений
трехфазных трансформаторов
«0» и «11»

получаются еще по три группы: из группы 0 образуются группы 4 и 8; из 6—10 и 2; из 11—3 и 7; из 5—9 и 1.

В табл. 2.1 представлены схемы соединений и круговые перестановки выводов обмоток для всех 12 групп соединений.

Опытным путем группа соединения определяется следующим образом. Соединяют одноименные выводы обмоток высшего и низшего напряжений, например A и a . Присоединяют трансформатор к сети с симметричным напряжением и измеряют напряжения между выводами трансформатора. По измеренным напряжениям строят векторную диаграмму, которая должна совпасть с одной из диаграмм табл. 2.1. После этого определяют группу соединения трансформатора.

Схема соединения в зигзаг дает возможность получить любую схему соединения, т.е. любой угол между напряжениями. Как очевидно из рис. 2.42, угол между векторами высшего и низшего напряжений зависит от соотношения чисел витков обмоток, соединенных последовательно и расположенных на разных стержнях. Это преимущество схемы в зигзаг используется в специальных схемах, когда требуется получить промежуточные электрические углы между напряжениями, меньше 30° .

Стандартизованы две группы соединений $Y/Y-0$ и $I/\Delta-11$ (рис. 2.44) со сдвигом фаз 0° и 330° . В эксплуатации вполне достаточно иметь две группы соединений и не выпускать 10 остальных групп.

Изучая трансформаторы, необходимо иметь представление о том, как получаются другие группы соединений. Из групп 0 и 11 переменной начал и концов нетрудно получить группы 6 и 5.

Группы 0, 6 и 11, 5 — основные. Из них круговой перестановкой выводов по-

Таблица 2.1

Группа	Угловое смещение ЭДС	Векторная диаграмма линейных ЭДС	Схема соединения и обозначения выводов			Группа	Угловое смещение ЭДС	Векторная диаграмма линейных ЭДС	Схема соединения и обозначения выводов		
			Y/Y	Δ/Δ	Δ/Z				Y/Y	Δ/Δ	Δ/Z
0	0°					11	330°				
4	120°		Схема та же	Схема та же		3	90°		Схема та же		Схема та же
8	240°		Схема та же	Схема та же		7	210°		Схема та же		Схема та же
6	180°					5	150°				
10	300°		Схема та же	Схема та же		9	270°		Схема та же		Схема та же
2	60°		Схема та же	Схема та же		1	30°		Схема та же		Схема та же

2.9. Особенности работы насыщенных однофазных и трехфазных трансформаторов

Процессами, происходящими в электротехнической стали в постоянных и переменных магнитных полях, занимаются специалисты в области физики твердого тела. Электромехаников интересуют интегральные эффекты сложных событий в доменных структурах стали — потери, реактивная мощность, характеристики намагничивания, влияние механической обработки и другие показатели.

Основной характеристикой электротехнической стали является магнитная характеристика (рис. 2.45). Магнитная характеристика снимается на постоянном токе. При этом потери в стали отсутствуют, поэтому она соответствует мгновенным значениям потока и реактивной составляющей намагничивающего тока при снятии характеристики намагничивания на переменном токе.

Между потоками и реактивной составляющей тока намагничивания существует нелинейная связь, определяемая сортом стали, размерами и конструкцией магнитной системы, частотой и температурой. Поэтому снятая в опыте холостого хода характеристика трансформатора дает возможность в полной мере судить о магнитных свойствах магнитной системы.

При проектировании используются снятые экспериментально зависимости удельных потерь и удельной намагничивающей мощности от индукции и частоты. Удельные потери в стали характеризуют потери в ваттах на 1 кг массы

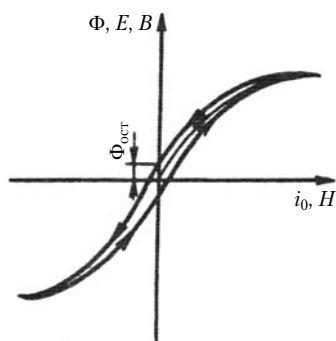


Рис. 2.45. Магнитная характеристика электротехнической стали

магнитопровода, а удельная намагничивающая мощность — это реактивная мощность в вольт-амперах на 1 кг массы. Обычно в таблицах дается также удельная намагничивающая мощность стыковых соединений ярма и стержня трансформатора.

Магнитная характеристика снимается экспериментально или рассчитывается. Она приближенно может быть выражена аналитически.

Точного аналитического описания магнитная характери-

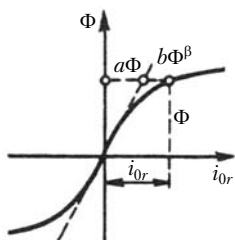


Рис. 2.46. К аналитическому описанию магнитной характеристики

ка не имеет. Существуют десятки приближенных математических описаний магнитной характеристики, т.е. зависимости магнитного потока от реактивной составляющей тока намагничивания:

$$i_{0r} = a\Phi + b\Phi^\beta, \quad (2.82)$$

где a , b и показатель степени β могут быть найдены по двум точкам характеристики и начальному наклону характеристики (рис. 2.46).

Характеристики намагничивания в каждом цикле перемагничивания отличаются друг от друга. Восходящая и нисходящая ветви характеристики $B = f(H)$ не совпадают (см. рис. 2.45). Площадь петли характеристики $B = f(H)$ характеризует потери на перемагничивание, т.е. потери на гистерезис. При снятии напряжения с трансформатора остается остаточное поле $\Phi_{\text{ост}}$, которое влияет на будущий процесс включения трансформатора.

При проектировании трансформаторов и электрических машин расчетную индукцию выбирают на колене характеристики намагничивания. Это обеспечивает снижение массы и стоимости трансформатора. Насыщение магнитной системы вызывает ряд особенностей в работе трансформаторов.

Рассмотрим нелинейный однофазный трансформатор. Если к его первичной обмотке приложено синусоидальное напряжение, поток в магнитопроводе будет синусоидальным, а намагничивающий ток — несинусоидальным (рис. 2.47).

В насыщенном трансформаторе при синусоидальном токе несинусоидален поток. В общем случае в насыщенном трансформаторе несинусоидальны поток и намагничивающий ток.

Из-за нелинейности магнитной характеристики в реактивной составляющей тока холостого хода появляются высшие гармоники. Если в потоке отсутствует постоянная составляющая, в намагничивающем токе будут только нечетные гармоники. Наибольшую

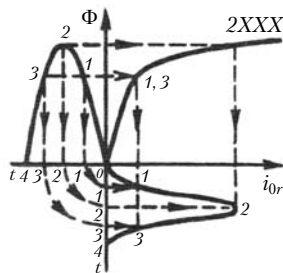


Рис. 2.47. К вопросу появления высших гармоник в намагничивающем токе

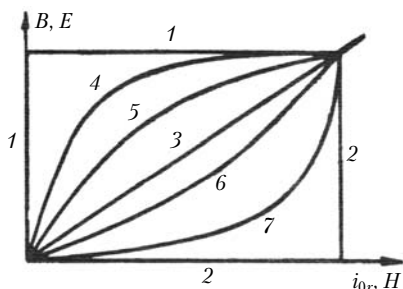


Рис. 2.48. Возможный вид кривых намагничивания

амплитуду имеют 3-я и 5-я гармоники, которые оказывают значительное влияние на работу трансформатора.

Амплитуды высших гармоник магнитного поля трансформатора определяются нелинейностью характеристики намагничивания (рис. 2.48). Наибольшие амплитуды

высших гармоник дают прямоугольные характеристики $B = f(H)$ (прямые 1 и 2). При прямоугольных характеристиках амплитуда 3-й гармоники достигает 30% 1-й, а 5-я — 20%.

Магнитные характеристики электротехнических сталей лежат между прямоугольной характеристикой 1 и линейной характеристикой 3. Сталь с магнитной характеристикой 3 для силовых трансформаторов не применяются. Такой вид магнитные характеристики имеют в слабых полях. При прямолинейном изменении $B = f(H)$, когда трансформатор ненасыщен, амплитуды высших гармоник равны нулю (прямая 3). При промежуточном характере кривых намагничивания амплитуды 4–7-й гармоник не равны нулю и не превышают соответственно значений для прямоугольной характеристики намагничивания.

При наличии в потоке постоянной составляющей в намагничивающем токе или потоке наряду с нечетными спектрами появляются спектры четных гармоник.

В многофазных трансформаторах нелинейность кривой намагничивания вносит свои особенности в работу трансформатора. Рассмотрим трехфазную группу однофазных трансформаторов с соединением обмоток по схеме звезда — звезда (см. рис. 2.8). К первичной обмотке каждого трансформатора подводится синусоидальное линейное напряжение, поэтому можно рассматривать работу каждого однофазного трансформатора отдельно.

При соединении обмоток в звезду 3-й гармоники намагничивающего тока по обмоткам трансформатора замыкаться не могут. Поэтому потоки в однофазных трансформаторах будут несинусоидальными и, следовательно, ЭДС и фазные напряжения будут несинусоидальными (рис. 2.49). Наличие в потоке и ЭДС высших гармоник приводит к увеличе-

нию амплитудного значения фазного напряжения. Это является нежелательным, особенно в высоковольтных трансформаторах, так как приводит при проектировании трансформаторов к увеличению толщины изоляции. Увеличение амплитуды потока приводит также к увеличению потерь в стали.

Соединение звезда — звезда с нулевым проводом обеспечивает протекание токов 3-й гармоники в нулевом проводе, поэтому потоки и фазные напряжения однофазных трансформаторов в этой схеме синусоидальные.

Токи 3-й гармоники, замыкаясь через емкости, имеющиеся между проводами линии передачи и землей, создают помехи для линии связи. Если нагрузка также имеет заземленную нейтраль, то токи 3-й гармоники, проходя по земле, могут оказывать вредное влияние на металлические подземные сооружения, вызывая их усиленную коррозию (рис. 2.50).

Схема соединения звезда — треугольник имеет преимущество перед схемами звезда — звезда. Токи 3-й гармоники замыкаются внутри треугольника, поэтому потоки и фазные напряжения в схеме трансформатора Y/Δ синусоидальны.

В зависимости от того, откуда поступает реактивная мощность — со стороны обмоток, соединенных в звезду, или со стороны обмоток, соединенных в треугольник, — реактивный ток имеет различную форму.

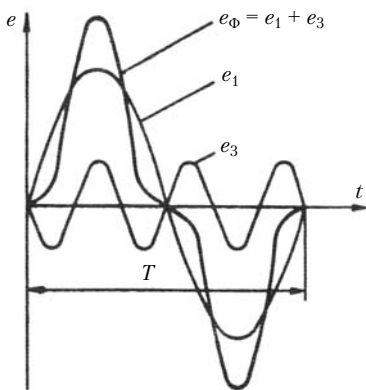


Рис. 2.49. Кривые ЭДС в насыщенном трансформаторе при синусоидальных намагничивающих токах

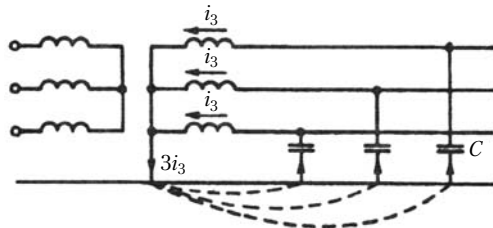


Рис. 2.50. Контур 3-й гармоники в схеме Y/Y_0

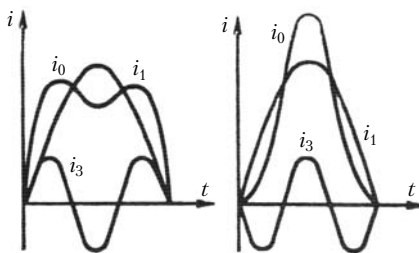


Рис. 2.51. Формы намагничивающего тока в схеме соединения звезда — треугольник:

а — при питании трансформатора реактивным током со стороны треугольника;
б — при питании со стороны звезды

Когда к сети подключена обмотка трансформатора, соединенная в треугольник, магнитное поле в трансформаторе создается только со стороны первичной обмотки (намагничивающий ток 1-й и 3-й гармоник протекает в обмотке, соединенной в треугольник, рис. 2.51, *а*).

При питании насыщенного трансформатора со стороны звезды ре-

активная мощность по 1-й гармонике поступает со стороны первичной обмотки, а со стороны вторичной обмотки создается магнитное поле 3-й гармоники (рис. 2.51, *б*). Как активные токи в первичной и вторичной обмотках сдвинуты на электрический угол, равный примерно 180° , так и намагничивающий ток 3-й гармоники сдвинут на электрический угол 180° при питании трансформатора со стороны треугольника и звезды.

Процессы намагничивания в трансформаторе были рассмотрены без учета вихревых токов в магнитопроводе. Это вполне допустимо, так как сопротивление стали велико и влиянием вихревых токов можно пренебречь.

Для того чтобы поток в трансформаторе был синусоидальным, необходимо создать контур, в котором будут замыкаться токи 3-й гармоники. В трехфазных двух- и трехобмоточных трансформаторах 3-я гармоника может замыкаться в одной из обмоток, соединенной в треугольник. В современных трансформаторах и автотрансформаторах классов напряжений 110, 150, 220, 330 и 500 кВ одна из обмоток обязательно соединяется в треугольник. Соединение в треугольник одной из обмоток применяется в трансформаторах класса напряжения 35 кВ при мощности 4000 кВ·А и выше.

Конструкция трансформаторов сказывается на особенностях работы трансформаторов. Так, в трехфазном трехстержневом трансформаторе поток 3-й гармоники замыкается по воздуху и по стенкам бака. В броневом трансформаторе поток 3-й гармоники замыкается по стали. В трехфазной группе однофазных трансформаторов потоки 3-й гармоники

также замыкаются по стали. В бронеовом трансформаторе и в трехфазной группе однофазных трансформаторов индуктивное сопротивление 3-й гармоники большое, что ограничивает ток 3-й гармоники.

В многофазных системах обмотки могут быть соединены в многофазную звезду и многоугольник. Например, для пятифазной системы может быть соединение обмоток в пятифазную звезду и пятиугольник (см. рис. 2.43). В пятифазной системе особое положение занимает 5-я гармоника — она может замыкаться в пятиугольнике и сумма токов 5-й гармоники будет равна нулю. При этом 3-я гармоника в пятифазной системе не компенсируется. В шестифазной системе преимущественное положение имеет 6-я гармоника, а в многофазной системе — m -я гармоника.

Насыщенный трансформатор в отличие от ненасыщенного является генератором высших гармоник. Наибольшее влияние на работу трансформаторов оказывают гармоники с частотами $3f$, $5f$, $7f$ и т.д. Эти гармоники являются источниками добавочных потерь и шума в трансформаторах.

Добавочные потери в насыщенных трансформаторах возникают из-за протекания токов высших гармоник по обмоткам, соединенным в треугольник или звезду с нулевым проводом. Добавочные потери имеют место также вследствие увеличения потерь в стали. Высшие гармоники потока являются причиной добавочных потерь в стали. Хотя амплитуды потоков высших гармоник небольшие, из-за высокой частоты перемагничивания эти потери могут оказывать заметное влияние на нагрев трансформатора.

Уровень шума в трансформаторах связан с магнитострикционными колебаниями. Максимум магнитострикционных колебаний лежит в районе частоты 100 Гц. Магнитный шум увеличивается с насыщением. Увеличение шума обычно связано также с некачественной шихтовкой стали и креплением основных и вспомогательных частей трансформатора.

2.10. Характеристики трансформаторов

Характеристиками трансформатора, наряду с характеристиками холостого хода и короткого замыкания, являются внешние характеристики и зависимость КПД от нагрузки.

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость напряжения на вторичной обмотке от нагрузки

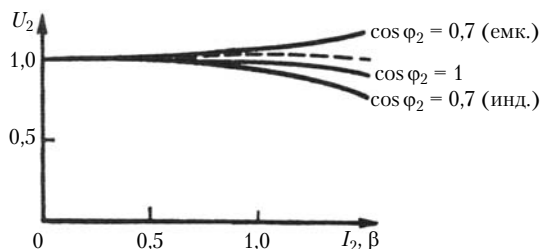


Рис. 2.52. Внешние характеристики трансформатора

$U_2 = f(I_2)$ или $U_2 = f(\beta)$, где $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}$ при различных значениях $\cos \varphi_2$ и неизменных первичном напряжении и частоте сети (рис. 2.52).

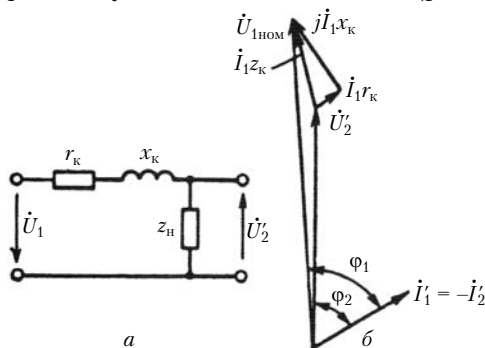
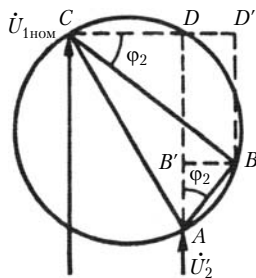
В силовых трансформаторах ток холостого хода невелик, поэтому при определении изменения вторичного напряжения пользуются упрощенной схемой замещения трансформатора, считая, что его внутреннее сопротивление определяется сопротивлением короткого замыкания $z_k = r_k + jx_k$.

Для определения процентного изменения вторичного напряжения

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100\% = \frac{U_{1\text{ном}} - U'_2}{U_{20}} 100\% \quad (2.83)$$

следует обратиться к упрощенной схеме замещения (рис. 2.53, а) и векторной диаграмме (рис. 2.53, б).

Чтобы определить $\Delta u\%$, проведем некоторые простые перестроения и часть векторной диаграммы рис. 2.53, б изобразим в увеличенном масштабе (рис. 2.54). Из рис. 2.54

Рис. 2.53. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б), по которым определяется $\Delta u\%$ Рис. 2.54. Вспомогательные построения для определения $\Delta u\%$

$$\Delta u = \frac{U_{1\text{ном}} - U'_2}{U_{1\text{ном}}} = 1 - \frac{U'_2}{U_{1\text{ном}}} = 1 - \frac{1}{U_{1\text{ном}}} \left[\sqrt{U_{1\text{ном}}^2 - CD^2} - AD \right]. \quad (2.84)$$

Обозначив $n = \frac{CD}{U_{1\text{ном}}}$ и $m = \frac{AD}{U_{1\text{ном}}}$, получим

$$\Delta u = 1 - (\sqrt{1 - n^2} - m). \quad (2.85)$$

Заменив $\sqrt{1 - n^2} \approx 1 - \frac{n^2}{2}$, найдем

$$\Delta u = 1 - 1 + \frac{n^2}{2} + m = m + \frac{n^2}{2}, \quad (2.86)$$

откуда

$$\Delta u = \beta(u_{\text{а.к}} \cos \varphi_2 + u_{\text{р.к}} \sin \varphi_2) + \beta^2 \frac{(u_{\text{р.к}} \cos \varphi_2 - u_{\text{а.к}} \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (2.87)$$

Треугольник ACB на векторной диаграмме — треугольник короткого замыкания. Его катет BC характеризует реактивную составляющую напряжения короткого замыкания $u_{\text{р.к}}$, а катет AB — активную составляющую $u_{\text{а.к}}$.

Обычно в выражении (2.87) пренебрегают вторым членом и определяют процентное изменение вторичного напряжения от коэффициента нагрузки β или от отношения текущего значения мощности к номинальной $\frac{P_2}{P_{2\text{ном}}}$ по формуле

$$\Delta u = \beta(u_{\text{а.к}} \cos \varphi_2 + u_{\text{р.к}} \sin \varphi_2). \quad (2.88)$$

Как следует из выражения (2.88), Δu определяется значением β и характером нагрузки ($\cos \varphi_2$), а также напряжением короткого замыкания — его активной $u_{\text{а.к}}$ и реактивной $u_{\text{р.к}}$ составляющими. При активноемкостной нагрузке из-за увеличения реактивной мощности при увеличении тока I_2 напряжение на вторичной обмотке растет. Из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении $z_{\text{к}}$ напряжение u_2 падает при активной и активно-индуктивной нагрузках.

На рис. 2.55 представлена зависимость Δu от $\cos \varphi_2$ при неизменном токе нагрузки, равном $I_{\text{ном}}$. Для создания поля в трансформаторе необходима реактивная мощность. Эта мощность по упрощенной схеме замещения определяется реактивным сопротивлением рассеяния трансформатора $x_{\text{к}}$. При активно-емкостной нагрузке реактивная мощность для создания поля трансформатора может забираться от нагрузки. При увеличении емкости в нагрузке реактивная мощ-

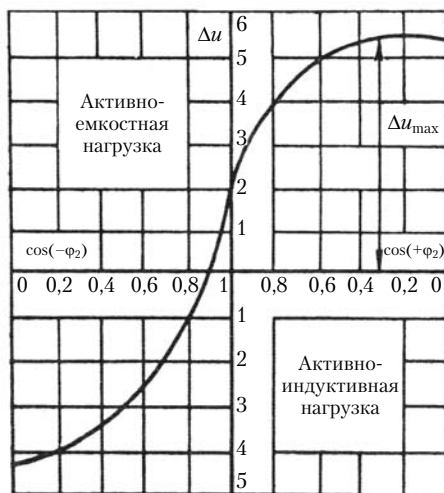


Рис. 2.55. Зависимость $\Delta u = f(\cos \varphi_2)$ при токе нагрузки, равном номинальному

ность расходуется на создание поля в трансформаторе и избыток ее отдается в первичную сеть. При этом растет ЭДС $E_1 = E'_2$, что приводит к перевозбуждению трансформатора, т.е. к возрастанию потока и увеличению напряжения u .

Коэффициент полезного действия трансформатора показывает соотношение между мощностью, которая передается из первичной обмотки во вторичную и обратно, и мощностью, которая преобразуется в тепло. Коэффициент полезного действия определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}, \quad (2.89)$$

где $\sum P$ — сумма потерь в трансформаторе; P_2 — текущее значение мощности вторичной обмотки.

Мощность во вторичной обмотке

$$P_2 = mU_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2, \quad (2.90)$$

где $P_{2\text{ном}}$ — номинальное значение мощности трансформатора при $\cos \varphi_2 = 1$; β — коэффициент загрузки.

КПД рекомендуется определять по следующей формуле:

$$\eta = 1 - \frac{P_{\text{х. ном}} + \beta^2 P_{\text{к. ном}}}{\beta P_{2\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{х. ном}} + \beta^2 P_{\text{к. ном}}}, \quad (2.91)$$

где $P_{\text{х. ном}}$ — потери холостого хода при номинальном напряжении и частоте; $P_{\text{к. ном}}$ — потери короткого замыкания при номинальном токе.

Потери короткого замыкания состоят из основных потерь в металле обмоток (потерь в меди), потерь в токоведущих частях (отводах), а также из добавочных потерь, вызванных полем рассеяния в металле обмоток и ферромагнитных частях конструкции трансформатора — стенках бака, прессующих болтах и других конструктивных частях трансформатора. Эти добавочные потери в сумме могут достигать у трансформаторов мощностью 100 000 кВ·А и более 20–25% полных потерь короткого замыкания.

Зависимость КПД от нагрузки представлена на рис. 2.56. Как очевидно из зависимости $\eta = f(\beta)$, эта кривая имеет максимум, который можно определить, приравняв $\frac{d\eta}{d\beta}$ нулю.

Коэффициент полезного действия имеет максимум, когда потери холостого хода равны потерям в меди: $P_{\text{х. ном}} = \beta^2 P_{\text{к. ном}}$, т.е. при равенстве постоянных потерь $P_{\text{х. ном}}$, не зависящих от нагрузки, — переменным потерям — потерям в меди в трансформаторе $\beta_m^2 P_{\text{к. ном}}$.

Из равенства потерь холостого хода (потерь в стали) и потерь в меди следует, что

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_{\text{х. ном}}}{P_{\text{к. ном}}}}. \quad (2.92)$$

При проектировании трансформаторов можно изменять соотношение между потерями в меди и стали, т.е. соотношение между массами меди и стали.

Силовые масляные трансформаторы рассчитываются таким образом, чтобы

$$P_{\text{х. ном}} : P_{\text{к. ном}} \approx (1 : 4) \div (1 : 6). \quad (2.93)$$

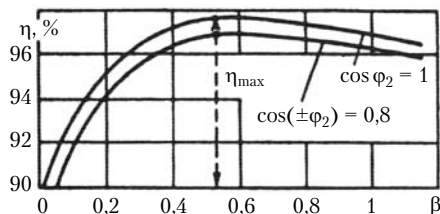


Рис. 2.56. Зависимость КПД от нагрузки при неизменном $\cos \varphi_2$

Поэтому КПД имеет максимум при нагрузке 0,5—0,7 номинальной (см. рис. 2.56). Таким образом, выбор максимума в кривой КПД зависит от расчетчика. Обычно трансформаторы в энергосистеме работают с некоторой недогрузкой — в области максимального значения КПД.

Чтобы сдвинуть максимум КПД в область номинальной нагрузки или иметь максимум КПД при перегрузках, надо заложить больше меди в его обмотки, т.е. уменьшить плотность тока в обмотках. Такой трансформатор, естественно, будет более дорогим.

При передаче реактивной мощности — уменьшении $\cos \varphi_2$ — уменьшается КПД (см. рис. 2.56), что следует из формулы (2.91).

Как правило, трансформаторы неравномерно загружены в течение суток и в течение года, так как потребление электрической энергии значительно изменяется вечером и ночью, а также в летнее время и в период осенне-зимнего максимума. Поэтому для оценки использования трансформаторов в энергосистемах иногда говорят о годовом КПД, который определяется отношением отданной во вторичную сеть энергии в течение года к энергии, полученной из сети.

2.11. Параллельная работа трансформаторов

Один мощный трансформатор делать выгоднее, чем несколько трансформаторов на ту же суммарную мощность. В мощном трансформаторе меньше расход активных материалов и выше энергетические показатели. Однако часто в энергетических установках необходимо включать несколько трансформаторов на параллельную работу. При этом легче решается проблема резервирования энергоснабжения потребителей, упрощается организация ремонтных работ, при недогрузках можно отключить часть трансформаторов. На крупных распределительных установках иногда нельзя установить один трансформатор, так как предельная мощность, на которую может быть построен трансформатор, меньше мощности распределительной подстанции.

При параллельной работе трансформаторов как первичные, так и вторичные обмотки подключены к общим шинам. Эквивалентная схема замещения трех параллельно включенных трансформаторов показана на рис. 2.57. Следует отметить, что схема подключения трансформаторов $T_1 - T_3$ к генераторам $G_1 - G_3$, показанная на рис. 2.58, прямого отношения к параллельной работе трансформаторов не имеет.

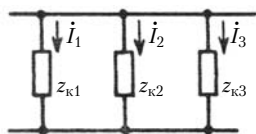


Рис. 2.57. Схема параллельной работы трансформаторов

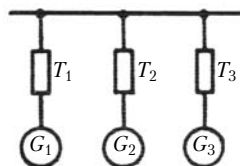


Рис. 2.58. Схема работы генераторов на общие шины

При включении трансформаторов на параллельную работу необходимо для лучшего использования установленной мощности обеспечить распределение нагрузки пропорционально мощности трансформаторов, а при холостом ходе не должно быть уравнильных токов. При включении на параллельную работу трансформаторов одинаковой мощности эти условия легко выполняются. Но на практике на параллельную работу включаются и трансформаторы, имеющие неодинаковые номинальные мощности.

При параллельной работе трансформаторов необходимо, чтобы напряжения на первичных и вторичных обмотках были одинаковыми и, как следствие, коэффициенты трансформации равны друг другу. На параллельную работу включаются трансформаторы, имеющие одинаковые группы соединений, что исключает появление уравнильных токов.

Если у трансформаторов, включенных параллельно, коэффициенты трансформации несколько отличаются друг от друга из-за различия ЭДС, в обмотках трансформаторов будут протекать уравнильные токи. Допускается включение на параллельную работу трансформаторов с коэффициентами трансформации, отличающимися не более чем на 1%. При этих условиях уравнильные токи будут незначительными.

Если включить на параллельную работу трансформаторы групп 0 и 11, то из-за сдвига фаз между \dot{E}_1 и \dot{E}_2 , равного 30° , появится $\Delta \dot{E}$ (рис. 2.59):

$$\Delta \dot{E} \approx 2E_1 \sin 15^\circ \approx 0,5E_1 \quad (2.94)$$

и уравнильный ток будет в несколько раз больше номинального. Уравнильные токи протекают в первичных и вторичных обмотках трансформато-

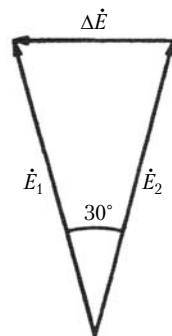


Рис. 2.59. К определению уравнильных токов в трансформаторах

ров, они определяются $\Delta \dot{E}$ и сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов.

Распределение нагрузок между параллельно включенными трансформаторами зависит от сопротивлений короткого замыкания (см. рис. 2.57). Схема замещения трансформатора в самом простейшем виде представляется в виде сопротивления $z_k = z_1 + z_2$, поэтому при параллельной работе можно пользоваться схемой (см. рис. 2.57), по которой, пренебрегая различием ЭДС в фазах, можно получить

$$\dot{I}_1 : \dot{I}_2 : \dot{I}_3 = \frac{1}{z_{k1}} : \frac{1}{z_{k2}} : \frac{1}{z_{k3}}, \quad (2.95)$$

так как

$$\dot{I}_{1z_{k1}} = \dot{I}_{2z_{k2}} = \dot{I}_{3z_{k3}}. \quad (2.96)$$

Токи в трансформаторах, работающих параллельно, распределяются обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания. Поэтому для пропорционального распределения мощности между трансформаторами необходимо иметь одинаковые напряжения короткого замыкания $u_k\%$.

Допускается включение на параллельную работу трансформаторов, когда $u_k\%$ отличаются не более чем на 10%. При параллельной работе трансформаторов с разными $u_k\%$ перегружается трансформатор, имеющий меньшее значение $u_k\%$.

Если трансформатор, имеющий наименьшее значение $u_k\%$, будет нагружен номинальной мощностью, другие трансформаторы с большими $u_k\%$ будут недогружены. При этом другие трансформаторы еще не будут иметь номинальную нагрузку и будет иметь место недоиспользование установленной мощности трансформаторов.

У трансформаторов большой мощности реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в процентном отношении к активной составляющей больше, чем у трансформаторов меньшей мощности, при параллельной работе мощности также будут распределяться неравномерно. Вследствие этого рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы, отличающиеся по мощности не более чем в 3 раза.

2.12. Многообмоточные трансформаторы

Кроме двухобмоточных трансформаторов промышленностью выпускается большое количество силовых трансформаторов, имеющих три обмотки, а трансформаторы малой

мощности, как правило, имеют несколько обмоток, рассчитанных на несколько напряжений. Следует иметь в виду, что все силовые трансформаторы имеют магнитопровод, в котором протекают вихревые токи. Если рассматривать эквивалентный контур вихревых токов как отдельную обмотку, замкнутую накоротко, то следует сделать вывод, что у всех трансформаторов как минимум три обмотки и самый простой трансформатор — трехобмоточный.

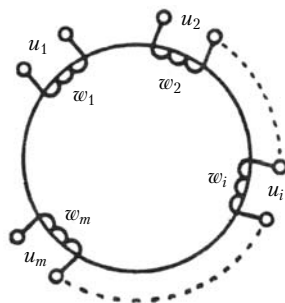


Рис. 2.60. Схема многообмоточного однофазного трансформатора

В многообмоточных трансформаторах на одном стержне располагается несколько обмоток.

Рассмотрим однофазный, с одинаковым числом витков, многообмоточный трансформатор (рис. 2.60). Считаем, что m обмоток пронизываются общим рабочим потоком Φ_m , сцепленным со всеми обмотками, а каждая имеет свой поток рассеяния. При этих условиях уравнения m -обмоточного трансформатора будут иметь вид

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 + \frac{d}{dt}L_1 & \frac{d}{dt}M_{12} & \dots & \frac{d}{dt}M_{1i} & \dots & \frac{d}{dt}M_{1m} \\ \frac{d}{dt}M_{21} & r_2 + \frac{d}{dt}L_2 & \dots & \frac{d}{dt}M_{2i} & \dots & \frac{d}{dt}M_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d}{dt}M_{i1} & \frac{d}{dt}M_{i2} & \dots & r_i + \frac{d}{dt}L_i & \dots & \frac{d}{dt}M_{im} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d}{dt}M_{m1} & \frac{d}{dt}M_{m2} & \dots & \frac{d}{dt}M_{mi} & \dots & r_m + \frac{d}{dt}L_m \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \\ i_m \end{pmatrix}, \quad (2.97)$$

где $r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m$ — активные сопротивления обмоток; $L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_m$ — индуктивности обмоток, равные $L_1 = M + L_{\sigma 1}$, $L_2 = M + L_{\sigma 2}$ и т.д.; $M_{12}, M_{21}, \dots, M_{1i}, M_{2i}, \dots, M_{im}$ и т.д. — взаимные индуктивности между обмотками; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}, \dots, L_{\sigma i}, \dots, L_{\sigma m}$ — индуктивности рассеяния обмоток; $u_1, \dots, u_m, \dots, i_1, \dots, i_m$ — соответственно напряжения и токи в обмотках тобмоточного трансформатора.

В уравнениях (2.97) знак «+» перед напряжениями свидетельствует о том, что к этим обмоткам трансформатора подводится мощность.

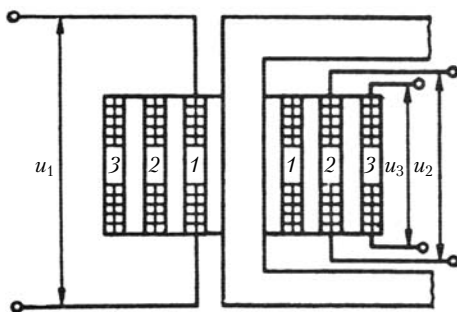


Рис. 2.61. Трехобмоточный трансформатор

Если в результате решения уравнений некоторые напряжения окажутся со знаком «-», это будет означать, что с данных обмоток снимается активная мощность.

Из уравнений m -обмоточного трансформатора как частный случай могут быть получены уравнения трехобмоточных трансформаторов, получивших среди силовых многообмоточных трансформаторов наибольшее распространение.

На каждом стержне трехобмоточного трансформатора три обмотки (рис. 2.61). Ближе к стержню располагается обмотка низшего напряжения 1. Как и двухобмоточные, трехобмоточные трансформаторы в большинстве случаев трехфазные.

Уравнения трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой, к которой подводится мощность, и двумя вторичными обмотками, имеющими разные напряжения, получаются из уравнений (2.97):

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ -u_2 \\ -u_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 + \frac{d}{dt}L_1 & \frac{d}{dt}M_{12} & \frac{d}{dt}M_{13} \\ \frac{d}{dt}M_{21} & r_2 + \frac{d}{dt}L_2 & \frac{d}{dt}M_{23} \\ \frac{d}{dt}M_{31} & \frac{d}{dt}M_{32} & r_3 + \frac{d}{dt}L_3 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_m \end{vmatrix}. \quad (2.98)$$

Для установившегося режима путем замены $\frac{d}{dt} \Leftrightarrow j\omega$ получим

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + \dot{I}_1 j\omega L_1 + \dot{I}_2 j\omega M_{12} + \dot{I}_3 j\omega M_{13}, \\ -\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 j\omega L_2 + \dot{I}_1 j\omega M_{21} + \dot{I}_3 j\omega M_{23}, \\ -\dot{U}_3 = \dot{I}_3 r_3 + \dot{I}_3 j\omega L_3 + \dot{I}_1 j\omega M_{31} + \dot{I}_2 j\omega M_{32}. \end{cases} \quad (2.99)$$

Считая, что трансформатор имеет приведенное число витков, т.е. $w_1 = w_2 = w_3$, а $L_1 = M + L_{\sigma 1}$, $L_2 = M + L_{\sigma 2}$, $L_3 = M + L_{\sigma 3}$ и все взаимные индуктивности одинаковые, для первичной обмотки имеем

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + \dot{I}_1 j\omega M + \dot{I}_1 j\omega L_{\sigma 1} + \dot{I}_2 j\omega M + \dot{I}_3 j\omega M. \quad (2.100)$$

Как и в двухобмоточных трансформаторах,

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3. \quad (2.101)$$

Тогда

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r + \dot{I}_1 jx_1 + \dot{I}_0 j\omega M, \quad (2.102)$$

где $x_1 = \omega L_{\sigma 1}$ —индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.

Так как $\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 j\omega M$, уравнение первичной обмотки имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1. \quad (2.103)$$

Аналогично получаются уравнения для двух вторичных обмоток трансформатора:

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2'; \quad (2.104)$$

$$\dot{U}_3' = \dot{E}_3' - \dot{I}_3' z_3'. \quad (2.105)$$

Тогда уравнения трехобмоточного трансформатора можно представить в виде

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 z_1, \\ \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2', \\ \dot{U}_3' = \dot{E}_3' - \dot{I}_3' z_3', \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3. \end{cases} \quad (2.106)$$

В этих уравнениях полные сопротивления обмоток равны

$$z_1 = r_1 + jx_1; \quad z_2' = r_2' + jx_2'; \quad z_3' = r_3' + jx_3',$$

а $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$, $x_3 = \omega L_{\sigma 3}$.

Векторная диаграмма трехобмоточного трансформатора, соответствующая уравнениям (2.106), представлена на рис. 2.62. Для уравнений (2.106) и векторной диаграммы трехобмоточного трансформатора (см. рис. 2.62) справедлива трехлучевая схема замещения (рис. 2.63).

Из уравнений, векторной диаграммы и схемы замещения следует, что при изменении нагрузки на одной из вторичных обмоток изменяются напряжения на обеих обмотках.

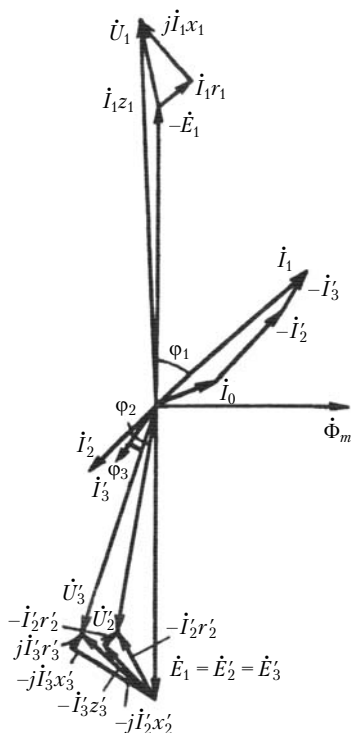


Рис. 2.62. Векторная диаграмма трехобмоточного трансформатора

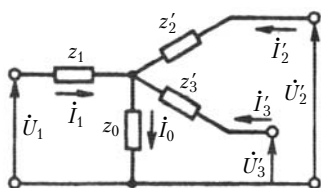


Рис. 2.63. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

во втором опыте

$$z_{k13} = r_{k13} + jx_{k13} = z_1 + z_3'. \quad (2.108)$$

Из третьего опыта определяется

$$z_{k23} = r_{k23} + jx_{k23} = z_2' + z_3'. \quad (2.109)$$

При изменении токов нагрузки растет ток в первичной обмотке. При этом намагничивающий ток и поток в трехобмоточном трансформаторе практически не изменяются. Степень влияния нагрузки в одной из вторичных обмоток на другую зависит от сопротивления z_1 так как чем больше это сопротивление, тем больше падение напряжения на первичной обмотке и тем больше изменение ЭДС.

Если считать сопротивление z_0 в схеме замещения трехобмоточного трансформатора равным бесконечности, то в схеме замещения нетрудно обнаружить три контура, образуемых сопротивлениями схемы замещения. Поэтому для определения параметров схемы замещения необходимо провести три опыта короткого замыкания (рис. 2.64). В этих опытах поочередно замыкаются и размыкаются обмотки трансформатора так, чтобы в каждом опыте исключалось одно сопротивление.

В первом опыте определяется

$$\begin{aligned} z_{k12} &= r_{k12} + jx_{k12} = \\ &= z_1 + z_2', \end{aligned} \quad (2.107)$$

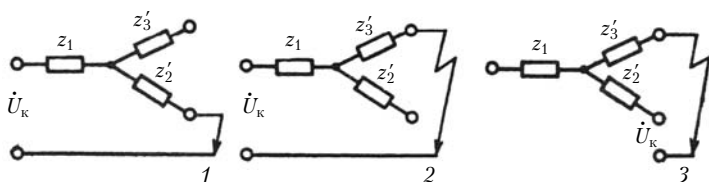


Рис. 2.64. Схема опытов короткого замыкания для определения параметров схемы замещения трехобмоточного трансформатора

Из трех опытов короткого замыкания можно найти параметры схемы замещения:

$$z_1 = \frac{1}{2}(z_{k12} + z_{k13} - z_{k23}); \quad (2.110)$$

$$z'_2 = \frac{1}{2}(z_{k12} + z_{k23} - z_{k13}); \quad (2.111)$$

$$z'_3 = \frac{1}{2}(z_{k13} + z_{k23} - z_{k12}). \quad (2.112)$$

Сопротивление намагничивающего контура находится из опыта холостого хода, как и для двухобмоточного трансформатора.

Следует иметь в виду, что из опытов короткого замыкания определяются сопротивления x_{k12} , x_{k13} и x_{k23} , равные сумме индуктивных сопротивлений обмоток. Значения индуктивных сопротивлений обмоток x_1 , x'_2 и x'_3 зависят от расположения обмоток относительно друг друга и относительно стержня трансформатора. При формальном определении x_1 , x'_2 и x'_3 из опытов короткого замыкания могут быть получены отрицательные значения индуктивных сопротивлений.

Изменение напряжения на обмотках трехобмоточного трансформатора определяется для двух обмоток:

$$\Delta U_{12} = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \quad \text{и} \quad \Delta U_{13} = \frac{U_1 - U'_3}{U_1}.$$

При таком выполнении обмоток трансформаторов ГОСТ 1983—2001 устанавливает равенство мощностей всех трех обмоток

$$100\% \quad 100\% \quad 100\%.$$

При другом выполнении обмоток трансформатор может отдавать 100% мощности в одну из вторичных обмоток или суммарную мощность, равную 100%, — в обе вторичные обмотки.

Ранее выпускались трансформаторы с обмотками

100%	100%	67%
100%	67%	100%
100%	67%	67%.

Эти трансформаторы имели меньший расход меди, но и меньшую маневренность, так как в них можно было направлять 100% мощности или не больше $2/3$ мощности в одну обмотку.

Трехобмоточные трансформаторы имеют схемы соединения $Y/Y_0/\Delta-0-11$ или $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$. Однофазные трехобмоточные трансформаторы имеют группу соединения 0. На паспортной табличке трансформатора указываются напряжения короткого замыкания $u_{к12}\%$, $u_{к13}\%$ и $u_{к23}\%$.

Трехобмоточные трансформаторы применяются в качестве повышающих трансформаторов, когда они имеют две первичные обмотки, подключенные к выводам двух генераторов, а их третья обмотка подключается к высоковольтной сети. В этом случае применяются три таких трансформатора, соединенных в трехфазную группу. Схема однофазного трехобмоточного трансформатора дана на рис. 2.65.

Первичные обмотки размещаются на разных стержнях, расщепленная высоковольтная вторичная обмотка имеет две параллельные ветви, охватывающие оба стержня. Трансформатор может работать при отключении одного из генераторов (G_1 или G_2). Тогда во вторичной обмотке ток протекает в одной из параллельных ветвей. Из этой схемы очевидно, что трехобмоточный трансформатор объединяет в одной конструкции два двухобмоточных трансформатора.

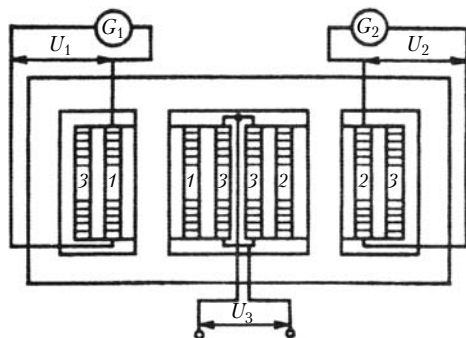


Рис. 2.65. Однофазный трехобмоточный трансформатор с двумя первичными и одной вторичной обмоткой

Трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками могут иметь различные номинальные напряжения на этих обмотках. При неравенстве напряжений генераторов G_1 и G_2 ток \dot{I}_3 в параллельных ветвях распределяется неравномерно. При этом и потоки Φ_1 и Φ_2 , определяемые напряжениями \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , будут различны, что приведет к различию в насыщении стержней, неравномерному распределению потерь в стали.

Рассмотренную теорию трехобмоточных трансформаторов можно перенести на четырехобмоточные и в пределе — на многообмоточные трансформаторы.

2.13. Автотрансформаторы

В электромагнитных преобразователях энергии — трансформаторах — передача энергии из одной обмотки в другую осуществляется магнитным полем, энергия которого сосредоточена в магнитопроводе. В автотрансформаторах передача энергии осуществляется как магнитным полем, так и за счет электрической связи между первичной и вторичной обмотками (рис. 2.66).

Схема автотрансформатора (см. рис. 2.66) может быть представлена иначе (рис. 2.67). Эта схема дает возможность лучше представить преимущества автотрансформатора перед трансформатором при коэффициентах трансформации, близких к единице. В трансформаторах токи в первичной и вторичной обмотках направлены встречно, поэтому в автотрансформаторах за счет совмещения обмоток при небольших коэффициентах трансформации $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$ обеспечивается экономия меди. Если $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = 1$, то вся мощность передается за счет электрической связи между первичной и вторичной сторонами. При больших коэффициентах трансформации

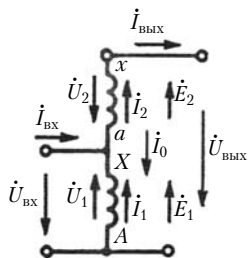


Рис. 2.66. Схема включения обмоток автотрансформатора

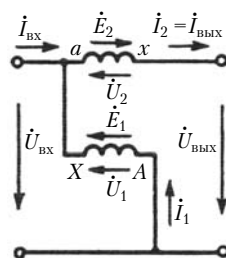


Рис. 2.67. Видоизмененная схема автотрансформатора

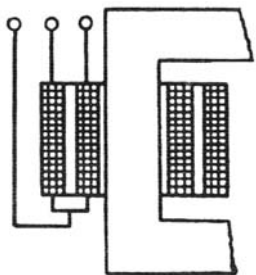


Рис. 2.68. Выполнение обмоток одной фазы автотрансформатора

ции снижение массы автотрансформатора по сравнению с трансформатором несущественно и применять автотрансформаторы нецелесообразно.

Везде, где необходимо преобразовывать близкие напряжения (110 и 220, 220 и 330, 330 и 500, 500 и 750 кВ), используются только автотрансформаторы. Для энергосистем часто требуется создание установок, преобразующих напряжения и имеющих предельные мощности. Габариты трансформаторов и автотрансформаторов лимитируются железнодорожными габаритами и возможностями доставки их с завода-изготовителя на место эксплуатации. Автотрансформатор из-за меньшего расхода активных материалов в заданных габаритах удастся выполнить на большую мощность, чем трансформатор.

Автотрансформаторы применяются также в низковольтных сетях в качестве лабораторных регуляторов напряжения небольшой мощности (ЛАТР). В таких автотрансформаторах регулирование напряжения осуществляется при перемещении скользящего контакта по виткам обмотки. При замыкании соседних витков в ЛАТР не происходит витковых замыканий, так как токи сети и нагрузки в совмещенной обмотке автотрансформатора близки друг к другу и направлены встречно.

В конструктивном отношении автотрансформаторы практически не отличаются от трансформаторов (рис. 2.68). На стержнях магнитопровода располагаются две обмотки. Выводы берутся от двух обмоток и общей точки. Большинство деталей автотрансформатора в конструктивном отношении не отличается от деталей трансформатора. Обычно активная часть автотрансформатора помещается в баке, наполненном маслом.

При проектировании автотрансформаторов следует различать проходную и расчетную мощности. Проходная мощность (т.е. та, которую может передать автотрансформатор) по обозначениям рис. 2.67 равняется

$$S_{\text{ат}} = U_{\text{вх}} I_{\text{вх}} \approx U_1 I_{\text{вх}} \approx U_{\text{вых}} I_2. \quad (2.113)$$

Расчетная мощность автотрансформатора — это мощность, которая передается магнитным полем:

$$S_{\text{расч}} = U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (2.114)$$

Расчетная мощность определяет габариты автотрансформатора и зависит от коэффициента трансформации:

$$S_{\text{расч}} = S_{\text{ат}} \left[1 - \frac{1}{1 + n_{21}} \right], \quad (2.115)$$

где $n_{12} = w_2/w_1$ — отношение чисел витков вторичной и первичной обмоток.

Из формулы (2.115) следует, что автотрансформатор при небольших коэффициентах трансформации требует меньше активных материалов. Поэтому при одинаковой проходной мощности применение автотрансформаторов выгоднее — они имеют меньшую стоимость и несколько лучшие энергетические показатели.

Недостатком автотрансформатора является необходимость выполнения изоляции обеих обмоток на большее напряжение, так как обмотки имеют электрическую связь.

Автотрансформаторы не могут применяться в качестве силовых в сетях 6 кВ при понижении напряжения до 0,38 кВ, так как напряжение 380 В подводится к оборудованию, на котором работают люди. При авариях из-за наличия электрической связи между обмотками в автотрансформаторе высшее напряжение может оказаться приложенным к обмотке низшего.

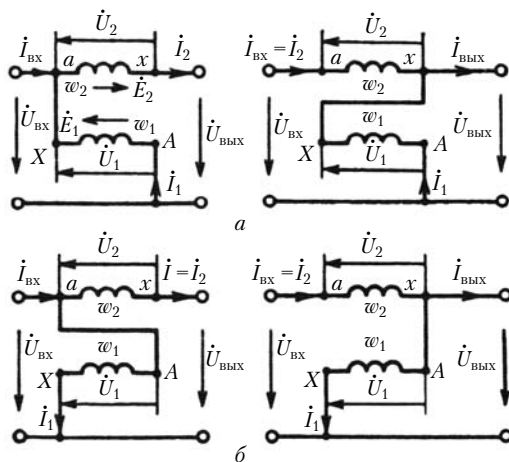


Рис. 2.69. Схемы включения однофазных автотрансформаторов: а — повышающие ($U_{\text{вых}} > U_{\text{вх}}$); б — понижающие ($U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}}$)

В зависимости от включения обмоток автотрансформатора можно получить повышение или понижение напряжения (рис. 2.69, а, б).

При анализе рабочих процессов в автотрансформаторах максимально используется теория трансформаторов. Наличие электрической связи между обмотками не вносит принципиального различия в уравнения автотрансформатора.

Уравнения автотрансформатора для схем рис. 2.69, а могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1, \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 n_{21}, \end{cases} \quad (2.116)$$

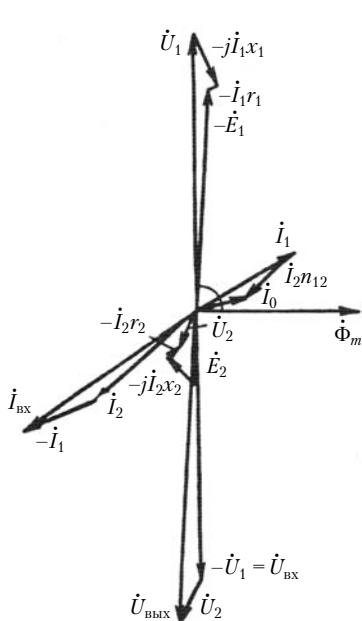


Рис. 2.70. Векторная диаграмма автотрансформатора

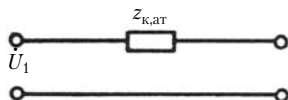


Рис. 2.71. Простейшая схема замещения автотрансформатора

где ток \dot{I}_0 считается протекающим в обмотке w_1 ; z_1 и z_2 — полные сопротивления обмоток автотрансформатора.

К уравнениям (2.116) следует добавить уравнения, связывающие токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 с токами $\dot{I}_{ВХ}$ и $\dot{I}_{ВЫХ}$ и напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_2 с напряжениями $\dot{U}_{ВХ}$ и $\dot{U}_{ВЫХ}$. При этом по рис. 2.66

$$\dot{U}_{ВХ} = -\dot{U}_1; \quad \dot{U}_{ВЫХ} = \dot{U}_{ВХ} + \dot{U}_2;$$

$$\dot{I}_{ВЫХ} = \dot{I}_2; \quad \dot{I}_{ВХ} = -\dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Векторная диаграмма автотрансформатора, соответствующая уравнениям (2.116), показана на рис. 2.70.

Напряжение короткого замыкания автотрансформатора, так же как и трансформатора, определяется по следующему выражению:

$$u_{к, ат} \% = \frac{I_{2ном} z_{к, ат}}{U_{2ном}} 100\%. \quad (2.117)$$

Сопротивление короткого замыкания в автотрансформаторе $z_{к, ат}$ меньше, чем в трансформаторе, так как ток корот-

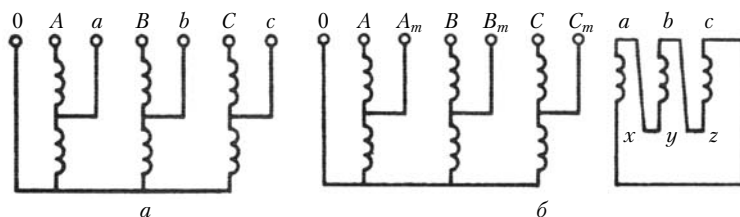


Рис. 2.72. Схемы включения обмоток трехфазного двухобмоточного (а) и трехфазного трехобмоточного (б) автотрансформаторов

кого замыкания протекает через часть обмотки, а магнитная система автотрансформатора насыщается потоками рассеяния. Схема замещения автотрансформатора при пренебрежении током холостого хода дана на рис. 2.71.

Большой ток короткого замыкания — недостаток автотрансформатора. Это вызывает необходимость ограничивать токи короткого замыкания в сетях за счет других элементов системы. Меньшее напряжение короткого замыкания и большие токи короткого замыкания автотрансформатора приводят к необходимости усиления механической стойкости автотрансформатора.

Наряду с однофазными двухобмоточными автотрансформаторами часто применяются трехфазные двухобмоточные (рис. 2.72, а) и трехфазные трехобмоточные (рис. 2.72, б) автотрансформаторы.

Трехфазные автотрансформаторы, как правило, на стороне высшего напряжения соединяются в звезду с нулевым проводом. Соединение в звезду обеспечивает снижение напряжения, на которое рассчитывается изоляция автотрансформатора.

Применение автотрансформаторов улучшает КПД энергосистем, обеспечивает снижение стоимости передачи энергии, но приводит к увеличению токов короткого замыкания.

2.14. Последовательные трансформаторы

Трансформаторы последовательного включения близки по своим характеристикам к автотрансформаторам. Применяются последовательные трансформаторы в высоковольтных сетях для регулирования напряжения по амплитуде и фазе в отдельных участках энергосистемы.

Компенсация падения напряжения в отдельных участках энергосистемы имеет важное значение для качества элек-

троэнергии. Когда регулируется только амплитуда напряжения, имеет место продольное регулирование. Если изменяется фаза напряжения, а амплитуда остается неизменной, говорят о поперечном регулировании напряжения. При этом в системе изменяется $\cos \varphi$. Когда изменяются и амплитуда, и фаза напряжения, имеет место продольно-поперечное регулирование напряжения. При этом регулируются активная и реактивная мощности.

Схема последовательного трансформатора с регулировочным трансформатором РТ показана на рис. 2.73. Регулировочный трансформатор имеет две вторичные обмотки, с которых отдельно может сниматься регулируемое напряжение. Это, по существу, трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками. На рис. 2.73 схема регулирования напряжения для упрощения показана для одной фазы.

Напряжения \dot{U}_{1Aq} и \dot{U}_{1Ad} сдвинуты на 90° , так как \dot{U}_{1Aq} снимается с двух обмоток, сдвинутых на 120° (см. рис. 2.73):

$$\dot{U}_{1A} = \dot{U}_{1Ad} + \dot{U}_{1Aq}. \quad (2.118)$$

Таким образом, напряжение на последовательном трансформаторе можно регулировать по амплитуде и фазе.

Трансформатор для продольно-поперечного регулирования напряжения получается громоздким и дорогим, поэтому чаще применяется только продольное регулирование. В этом случае регулировочный трансформатор имеет одну вторичную регулируемую под нагрузкой обмотку, что

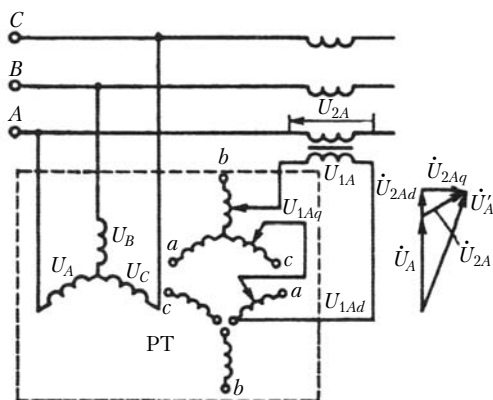


Рис. 2.73. Схема последовательного трансформатора с регулировочным трансформатором

дает возможность создать более простую и надежную установку.

Целый класс трансформаторов последовательного включения находит широкое применение в качестве измерительных трансформаторов. Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы тока и напряжения. В трансформаторах тока во вторичную обмотку включается прибор или устройство автоматики с низким сопротивлением (рис. 2.74). Трансформаторы напряжения применяются в высоковольтных сетях в качестве понижающих трансформаторов.

Измерительные трансформаторы изготавливаются на небольшую мощность до нескольких сотен вольт-ампер. Главное требование к ним при проектировании — малые погрешности при преобразовании токов и напряжений.

В трансформаторах тока первичная обмотка включена последовательно в сеть, а вторичная имеет небольшое сопротивление. Трансформатор тока, по существу, работает в режиме короткого замыкания.

Из схемы замещения трансформатора (рис. 2.75)

$$\frac{\dot{I}_0}{-\dot{I}'_2} = \frac{z'_2 + z'}{z_0}, \quad (2.119)$$

откуда

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_1 \frac{z_0}{z_0 + z'_2 + z'}. \quad (2.120)$$

Ток в приборе будет пропорционален измеряемому току \dot{I}_1 , если сопротивления в формуле (2.120) не будут зависеть от нагрузки, а $z'_2 + z'$ будет значительно меньше сопротивления z_0 . Погрешности трансформаторов тока зависят от сопротивлений.

Трансформаторы тока выполняются на токи до 40 000 А при токах во вторичных обмотках 1; 2; 2,5 и 5 А. Трансформаторы тока бывают с многовитковой или одновитковой обмоткой, расположенными на ленточном или набранном

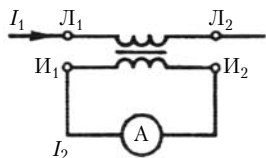


Рис. 2.74. Трансформатор тока

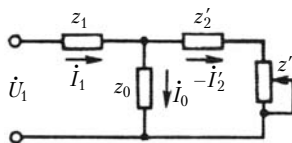


Рис. 2.75. Схема замещения трансформатора тока

из пластин магнитопровода. Первичной обмоткой может быть шина распределительного устройства. По роду изоляции трансформаторы тока делятся на сухие (с воздушной, фарфоровой или другой твердой изоляцией) и масляные.

Трансформаторы тока применяются в высоковольтных сетях вплоть до предельных напряжений 1150 кВ. Высоковольтные трансформаторы тока выпускаются в двухступенчатом каскадном исполнении.

Трансформаторы напряжения применяются в качестве измерительных трансформаторов в высоковольтных сетях и для питания цепей релейной защиты и автоматики в сетях низшего напряжения.

Трансформаторы напряжения работают в режиме холостого хода. Из Т-образной схемы замещения трансформатора следует

$$\dot{U}'_2 = -\dot{U}'_1 \frac{z}{z'_1 + C_1 z'_2 + C_1 z'_1}, \quad (2.121)$$

здесь $C_1 = 1 + \frac{z_1}{z_2}$.

Чтобы погрешности в трансформаторе напряжения были минимальными, необходимо стремиться к минимуму суммы $z + C_1 z'_2$ и иметь C_1 , близкое к единице.

Погрешности трансформаторов напряжения зависят от мощности трансформатора и нагрева.

Трансформаторы напряжения выполняются однофазными и трехфазными на напряжения от 0,38 до 1150 кВ. Часто применяются две вторичные обмотки, одна из которых соединяется в открытый треугольник.

Трансформаторы напряжения выпускаются сухими или масляными. При напряжениях 220 кВ и выше применяются каскадные схемы. При каскадном исполнении облегчается выполнение изоляции трансформатора.

Подробно измерительные трансформаторы рассматриваются в курсах «Электрические измерения» и «Электрические аппараты».

2.15. Регулирование напряжения трансформатора

При изменении нагрузки в энергосистеме, особенно на конце длинной линии ограниченной мощности, происходит изменение напряжения. Уменьшение напряжения даже на 3—5% по сравнению с номинальным приводит к увеличе-

нию токов, потребляемых электрическими машинами, что неблагоприятно сказывается на работе электрооборудования. Поэтому возникает необходимость в регулировании вторичного напряжения трансформаторов.

Изменять вторичное напряжение можно путем изменения числа витков вторичной обмотки или изменения потока трансформатора, сцепленного со вторичной обмоткой. Наибольшее распространение нашел способ, связанный с изменением числа витков вторичной или первичной обмотки, т.е. с изменением коэффициента трансформации.

Для изменения коэффициента трансформации обмотки выполняются с ответвлениями, чем и обеспечивается ступенчатое регулирование напряжения (рис. 2.76).

Стандартные трансформаторы средней мощности имеют в соответствии с ГОСТ 1983—2001 пять ответвлений. Среднее соответствует номинальному напряжению, а два других — напряжениям, отличающимся от номинального на $\pm 2,5$ и $\pm 5\%$. Трансформаторы большой мощности имеют большее число ответвлений. Ответвления выполняют чаще на стороне высшего напряжения, так как регулирование может быть проведено с большей точностью, а переключатель получается более компактным.

Переключаемые участки обмоток стараются располагать в середине обмотки, чтобы распределение токов по отношению к ярмам при работе на разных ответвлениях было симметричным. Необходимо стремиться к тому, чтобы линейные нагрузки были равномерно распределены вдоль первичной и вторичной обмоток. Отключение части витков нарушает равномерность магнитного поля рассеяния. При этом возникают электромагнитные силы, стремящиеся сдвинуть витки обмотки в осевом направлении. Эти силы при коротком замыкании могут разрушить обмотку. Для уменьшения перенапряжений переключение числа витков целесообразнее выполнять со стороны нулевой точки обмотки. При этом изоляцию переключаемых витков можно уменьшить.

Различают два способа регулирования напряжения трансформаторов: переключение ответвлений (отпаяк) трансфор-

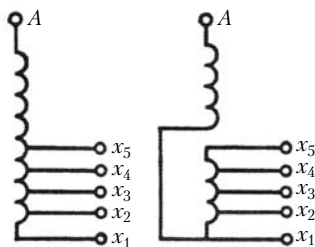


Рис. 2.76. Схемы обмоток с ответвлениями для ступенчатого регулирования напряжения

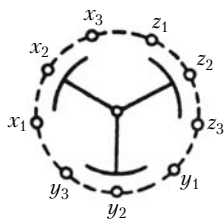


Рис. 2.77. Переключатель отпаек трансформатора

матора при отключении от сети и регулирование напряжения под нагрузкой. Переключатель, осуществляющий переключение ответвлений при отключении трансформатора от сети, имеет систему неподвижных контактов, соединенных с ответвлениями обмотки, и систему движущихся контактов (рис. 2.77). Переключатель располагается на крышке или стенке бака, и переключение осуществляется вручную. Регулирование напряжения таким переключателем осуществляется при сезонных изменениях нагрузки или в течение суток.

При переключении ответвлений обмотки под нагрузкой переключатель получается более сложным. Схема переключения ответвлений при регулировании коэффициента трансформации под нагрузкой показана на рис. 2.78. Чтобы при замыкании ответвлений в образовавшемся контуре не протекал большой ток, используют реактор L с расщепленной обмоткой. Токоограничивающий реактор рассчитан на кратковременную нагрузку и в рабочем состоянии, когда оба его контакта подключены к одному ответвлению, практически не имеет сопротивления, так как обе его половины включены встречно. Переключатели S_1 и S_2 и реактор размещаются в масляном баке трансформатора. Выключатели Q_1 и Q_2 , чтобы не загрязнять основной объем масла, размещаются в отдельном баке, располагаемом на стенке трансформатора. Управление переключающим устройством автоматизировано.

Переключение ответвлений происходит следующим образом. В положении 1 отключается выключатель Q_1 и переключатель S_1 переводится в положение 2. В положении 3, когда включается выключатель Q_1 в замкнутом контуре, образованном витками обмотки и коммутирующим устройством

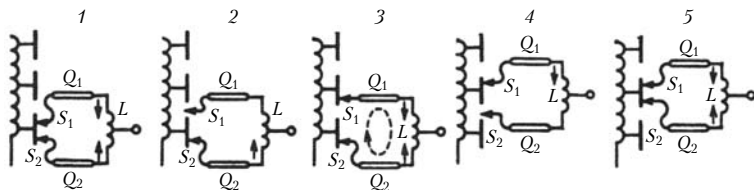


Рис. 2.78. Схема переключения отпаек трансформатора под нагрузкой

вом, ток ограничивается реактором L (ток в замкнутом контуре показан штриховой линией). Далее отключается выключатель Q_2 и переключатель S_2 переводится на другое ответвление (положение 4). В положении 5 включен выключатель Q_2 и трансформатор работает с другим коэффициентом трансформации.

Переключение ответвлений под нагрузкой может осуществляться по схеме рис. 2.79 с применением токоограничивающих сопротивлений. В этом устройстве есть три переключателя — S , S_1 , S_2 . При переходе на работу с ответвления x_1 сначала включается без тока переключатель S_2 , затем переключатель S переводится в положения 1, 3 и вводятся резисторы R_1 и R_2 , затем отключается переключатель S_1 и переключатель S замыкает контакты 3, 4. Во избежание перегрева сопротивлений и замкнутых витков обмотки трансформатора коммутация осуществляется в течение 0,1 с.

Плавное регулирование напряжения под нагрузкой можно получить при подмагничивании шунта, в котором замыкается часть рабочего потока трансформатора. Однако такие схемы громоздки и находят ограниченное применение.

В последние годы появилась необходимость стабилизировать, поддерживать с большой точностью неизменным напряжение на выводах ответственных потребителей. Стабилизаторы напряжения стали широко применяться также для питания бытовых приборов и телевизоров.

Высокая стабилизация напряжения достигается путем изменения коэффициента трансформации. При этом для переключения числа витков обмотки используются управляемые полупроводниковые приборы — тиристоры и транзисторы. Схемы стабилизаторов напряжения рассмотрены в работе [14].

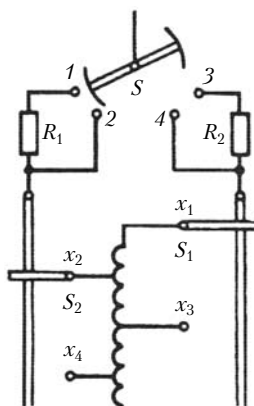


Рис. 2.79. Схема переключения отпаяк с токоограничивающими сопротивлениями

2.16. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

При эксплуатации трансформаторов в энергосистемах часто нагрузка по фазам может быть неодинаковой. Это связано обычно с подключением к трехфазным трансформаторам однофазной нагрузки: тяговых подстанций, электротермических печей, осветительной нагрузки и других однофазных потребителей. Неравномерность токов по фазам искажает напряжения трансформаторов, что приводит к неблагоприятным последствиям для потребителя — уменьшается мощность электродвигателей, повышается напряжение на лампах накаливания, что снижает срок их службы.

Несимметричные режимы имеют место при авариях — одно- и двухфазном коротких замыканиях. При несимметричных режимах может наступить режим перевозбуждения трансформатора или автотрансформатора, когда индукция в магнитопроводе превышает номинальную индукцию холостого хода. Действующие стандарты допускают 10%-ное превышение номинального напряжения. Более глубокие перевозбуждения в эксплуатации недопустимы. При индукциях больше 1,9 Тл значительно растет намагничивающий ток и деформируется магнитное поле вне магнитопровода, что приводит к увеличению добавочных потерь и нагреву нажимных плит стержней и стяжных шпилек.

Для исследования несимметричных режимов применяется метод симметричных составляющих. При этом считается, что первичные напряжения симметричны и трансформатор подключен к сети бесконечной мощности, а вторичные токи определяются несимметричной нагрузкой. По методу сим-

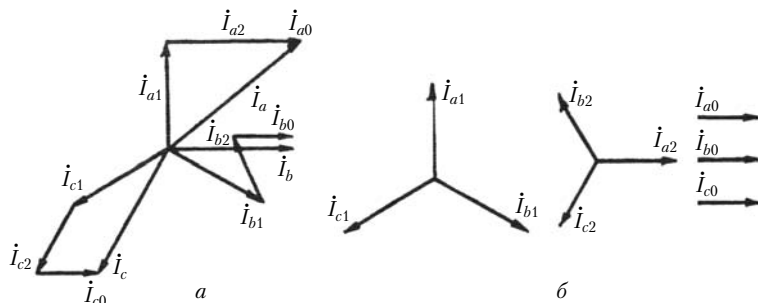


Рис. 2.80. Разложение несимметричной системы токов $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ (a) на симметричные составляющие (б)

метричных составляющих несимметричная система токов $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ (рис. 2.80, *а*) разлагается на симметричные системы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 2.80, *б*):

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}, \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0}, \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0}, \end{cases} \quad (2.122)$$

где $\dot{I}_{b1} = a^2 \dot{I}_{a1}$; $\dot{I}_{b2} = a \dot{I}_{a2}$; $\dot{I}_{c1} = a \dot{I}_{a1}$; $\dot{I}_{c2} = a^2 \dot{I}_{a2}$; $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$;
 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$; $1 + a + a^2 = 0$.

Тогда

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}, \\ \dot{I}_b = a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}, \\ \dot{I}_c = a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}, \end{cases} \quad (2.123)$$

откуда

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a \dot{I}_b + a^2 \dot{I}_c), \\ \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c), \\ \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \end{cases} \quad (2.124)$$

Аналогично можно вычислить симметричные последовательности напряжений несимметричной системы напряжений \dot{U}_a, \dot{U}_b и \dot{U}_c .

Составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей определяются аналитически по уравнениям (2.122)—(2.124) или при геометрическом построении. После разложения на симметричные составляющие применяют принцип наложения и анализируют работу трансформатора отдельно для прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Сопроотивления прямой и обратной последовательностей в трансформаторах равны друг другу. При изменении порядка чередования фаз на выводах трансформатора сопротивление трансформатора не изменяется. Изменение порядка следования фаз приводит лишь к изменению последовательности перемещения максимума потока по стержням. Схемы замещения трансформатора для прямой и обратной последовательностей одинаковы. Сопроотивление короткого замыкания трансформатора для прямой и обратной по-

следовательностей одно и то же и равно $z_1 + z'_2 = z_k = r_k + jx_k$, а сопротивление холостого хода равно z_{12} .

Токи нулевой последовательности имеют ту же частоту, что и токи прямой и обратной последовательностей, и совпадают по фазе во всех трех обмотках. Токи нулевой последовательности могут замыкаться в обмотках, соединенных в треугольник и в звезду с нулевым проводом. В нулевом проводе протекает ток

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{a0}. \quad (2.125)$$

Токи нулевой последовательности создают потоки нулевой последовательности, которые совпадают по фазе. Потoki и токи нулевой последовательности аналогичны потокам и токам 3-й гармоники и отличаются частотой и «происхождением». Потoki и токи 3-й гармоники появляются в трансформаторе из-за насыщения, а потоки и токи нулевой последовательности возникают из-за несимметрии нагрузки в трансформаторах, выполненных в конструктивном отношении симметричными. В общем случае напряжения и токи нулевой последовательности (как и обратной) возникают в несимметричных трансформаторах при симметричной нагрузке и в симметричных трансформаторах при несимметричной нагрузке.

Для нулевой последовательности может быть предложена схема замещения. Если рассматривать приведенный трансформатор, то, как и для прямой последовательности, может быть составлена Т-образная схема замещения (рис. 2.81). Параметры схемы замещения нулевой последовательности зависят от конструкции магнитопровода и обмоток трансформатора.

Так как потоки нулевой последовательности совпадают во всех трех фазах трехфазного трансформатора, в трех-

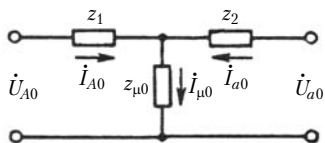


Рис. 2.81. Схема замещения нулевой последовательности:

\dot{I}_{00} — ток нулевой последовательности в намагничивающем контуре; z_{00} — сопротивление намагничивающего контура для нулевой последовательности

стержневом трансформаторе поток нулевой последовательности замыкается по воздуху и стенкам бака (рис. 2.82).

В броневах трехфазных трансформаторах и в трехфазной группе однофазных трансформаторов потоки нулевой последовательности замыкаются по стали. Естественно, индуктивное сопротивление в таких трансформаторах боль-

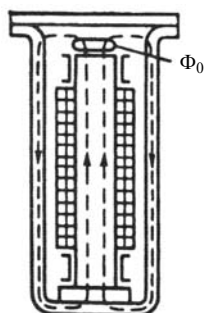


Рис. 2.82. Пути замыкания потоков нулевой последовательности

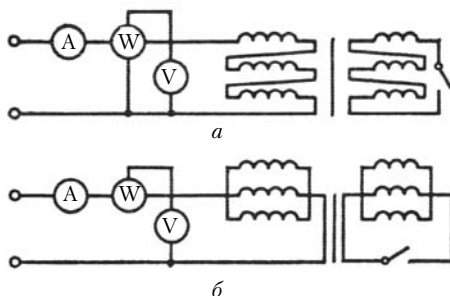


Рис. 2.83. Схемы для определения опытным путем параметров схемы замещения нулевой последовательности

ше, чем в трехстержневом трансформаторе, в котором индуктивное сопротивление нулевой последовательности примерно равно $z_0 \approx (5 \div 8)z_k$. Когда поток нулевой последовательности замыкается по стали, индуктивное сопротивление нулевой последовательности равно сопротивлению взаимной индукции.

Сопротивление нулевой последовательности определяется опытным путем по схемам рис. 2.83, а, б. Полное сопротивление нулевой последовательности

$$z_0 = r_0 + jx_0, \quad (2.126)$$

где r_0 , x_0 — активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности.

Как и в схемах замещения для прямой и обратной последовательностей, активные и индуктивные сопротивления относятся к одной фазе. Активные сопротивления схемы замещения определяются по показанию ваттметра:

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}. \quad (2.127)$$

Полное сопротивление определяется по показаниям амперметра и вольтметра. Для рис. 2.83, а $U \approx 3I_0z_0$.

В трехстержневом трансформаторе x_0 соизмеримо с r_0 , а в трехфазной группе однофазных трансформаторов $x_0 \approx x_{12}$. При соединении обмоток Y/Y₀ (рис. 2.84) токи нулевой последовательности протекают только во вторичной обмотке и не уравниваются токами в первичной обмотке. В транс-

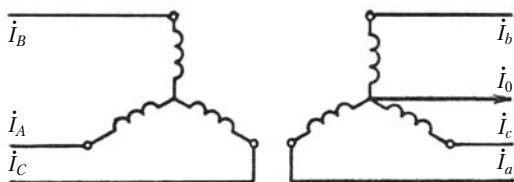


Рис. 2.84. Токи нулевой последовательности в схеме Y/Y_0

форматоре возникает поле, созданное МДС токов нулевой последовательности. Из выражения (2.125)

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 3\dot{I}_0 z_0. \quad (2.128)$$

Токи нулевой последовательности в схеме Y/Y_0 смещают геометрическую нейтраль из центра тяжести треугольника линейных напряжений, где была нейтраль при симметричной нагрузке (см. рис. 2.85). Смещение нейтрали приводит к искажению звезды фазных напряжений, что неблагоприятно сказывается на потерях в трансформаторе и искажает напряжение у потребителя. В броневых трансформаторах и в трехфазной группе однофазных трансформаторов даже небольшие токи нулевой последовательности приводят к значительному смещению нейтрали, так как $z_{\mu 0} \approx z_{12}$. Чтобы избежать большого смещения нейтрали в этих схемах, ограничивают ток нулевой последовательности 25% номинального тока трансформатора.

При соединении обмоток трансформатора Δ/Y_0 токи нулевой последовательности протекают как в первичной, так и во вторичной обмотке. Как токи нагрузки в обычной схеме, так и токи нулевой последовательности в схеме Δ/Y_0 компенсируют друг друга и не создают потока в трансформаторе. Поэтому в схеме Δ/Y_0 отсутствует смещение нейтрали.

Схема соединения Δ/Y_0 применяется там, где ожидается несимметричная нагрузка.

В высоковольтных трансформаторах желательно применять соединение обмоток в звезду, так как при этом фазные напряжения, на которые рассчитывается изоляция обмоток трансформатора, в $\sqrt{3}$ меньше, чем при соединении в треугольник. В трехобмоточных трансформаторах широко

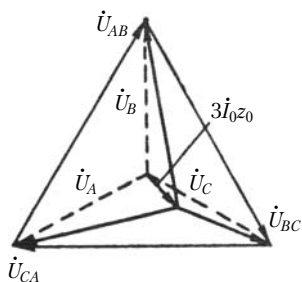


Рис. 2.85. Смещение нейтрали в схеме Y/Y_0

применяется соединение $Y/Y_0/\Delta$. Обмотка, соединенная в треугольник, обычно рассчитывается на часть мощности обмоток, соединенных в звезду. В этом случае ее называют компенсационной обмоткой. При несимметрии нагрузки токи нулевой последовательности протекают в компенсационной обмотке и в обмотке, соединенной по схеме Y_0 , и поток нулевой последовательности в трансформаторе отсутствует.

Если в трансформаторе имеется два или несколько контуров, в которых могут протекать либо токи нагрузки, либо токи высших гармоник, либо токи нулевой последовательности, вызванные несимметрией нагрузки, то при этом токи компенсируют друг друга и поток от этих токов в трансформаторе отсутствует. Любые некомпенсированные токи создают в магнитопроводе трансформатора поток.

В эксплуатации часто встречаются режимы работы трансформаторов при коротких замыканиях одной или двух фаз при различных соединениях обмоток или замыкании одной или двух фаз трансформатора на землю, а также при обрыве фазы. Расчет токов при несимметричных режимах имеет важное значение для эксплуатации силового оборудования энергосистем, настройки релейной защиты и автоматики.

Наибольшая несимметрия токов имеет место при однофазном коротком замыкании (рис. 2.86, *а* и *б*). Это крайний случай несимметричной нагрузки. Для схемы рис. 2.86, *а*

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_k}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_C = 0;$$

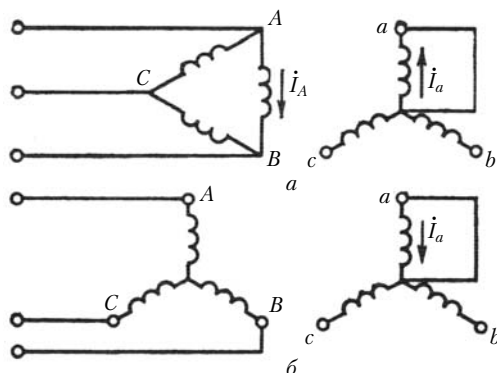


Рис. 2.86. Однофазные короткие замыкания в схемах Δ/Y и Y/Y

для схемы рис. 2.86, б

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = \frac{\dot{I}_a}{3}; \quad \dot{I}_{a0} = \frac{\dot{U}_A}{z_0 + z_2 + z_k},$$

где \dot{U}_A — фазное напряжение.

Из-за наличия нескомпенсированных токов нулевой последовательности при однофазном коротком замыкании в схеме Y/Y имеет место смещение нейтрали, что приводит к искажению звезды фазных напряжений за счет напряжения нулевой последовательности \dot{U}_{A0} (рис. 2.87). В схеме Δ/Y смещения нейтрали при однофазном коротком замыкании нет, если короткое замыкание — на стороне обмотки, соединенной в звезду.

К несимметричным режимам работы трансформаторов относятся режимы работы при обрыве фазы. Как правило, это аварийные режимы, и трансформаторы отключаются от энергосистемы. Однако в трехфазной группе Y_0/Δ при обрыве фазы (рис. 2.88) возможна временная передача энергии двумя фазами. Неполнофазный режим в этом случае при холостом ходе обеспечивает равенство линейных напряжений на вторичной стороне трансформатора $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$, которые образуют равносторонний треугольник. При этом ток $\dot{I}_0 = \dot{I}_B + \dot{I}_C$ может быть достаточно большим. Это необходимо учитывать при эксплуатации, так как заземление нулевой точки не рассчитывается на протекание больших токов.

Выше были рассмотрены лишь наиболее типичные примеры несимметричных режимов работы трансформаторов. Более подробно несимметричные режимы рассматриваются в спецкурсах.

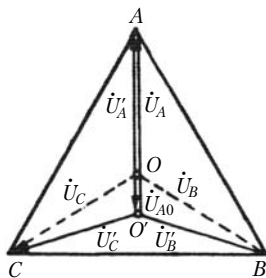


Рис. 2.87. Смещение нейтрали при однофазном коротком замыкании

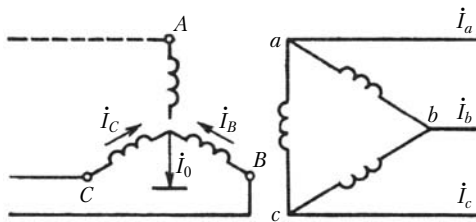


Рис. 2.88. Неполнофазный режим в схеме Y_0/Δ

2.17. Переходные процессы в трансформаторах

Переходные процессы в трансформаторах возникают при включении, при изменении нагрузки, различных коммутационных и аварийных режимах. Переходные процессы в трансформаторах описываются дифференциальными уравнениями (2.1), (2.97). При постоянных параметрах данные уравнения имеют аналитическое решение. При учете насыщения, когда индуктивности и взаимные индуктивности зависят от токов, для решения уравнений трансформатора применяют ЭВМ.

Вначале рассмотрим подключение трансформатора к сети. Будем анализировать включение однофазного ненасыщенного трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой (рис. 2.89). Для этого простого процесса можно записать следующее уравнение:

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.129)$$

В ненасыщенном трансформаторе справедливо соотношение

$$i_1 = \frac{w_1 \Phi}{L_1}. \quad (2.130)$$

Подставив формулу (2.130) в уравнение (2.129), исключим i_1 и для приложенного синусоидального напряжения получим

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = \frac{w_1 r_1}{L_1} \Phi + w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.131)$$

здесь ψ — угол, определяющий мгновенное значение напряжения в момент включения трансформатора.

Таким образом, включение трансформатора при холостом ходе рассматривается как подключение катушки к сети. Решение уравнения (2.131) имеет вид

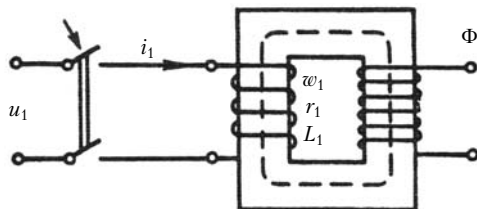


Рис. 2.89. Включение ненагруженного трансформатора в сеть

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = \Phi_m [\cos \psi e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \cos(\omega t + \psi)] \pm \Phi_{\text{ост}} e^{-\frac{r_1}{L_1} t}, \quad (2.132)$$

где Φ' — мгновенное значение установившегося потока:

$$\Phi' = \Phi_m \sin(\omega t + \psi + \pi/2) = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi); \quad (2.133)$$

Φ'' — мгновенное значение переходного свободного значения потока:

$$\Phi'' = (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_{\text{ост}}) e^{-\frac{r_1}{L_1} t}; \quad (2.134)$$

$\Phi_{\text{ост}}$ — остаточное значение магнитного потока.

Графическое изображение решения уравнения (2.132) представлено на рис. 2.90. Характер переходного процесса зависит от момента включения. При $\psi = \pi/2$ и $\Phi_{\text{ост}} = 0$ сразу устанавливается поток $\Phi_m \cos \omega t$ и процесс включения проходит без бросков тока.

Наиболее неблагоприятное протекание переходного процесса имеет место при $\psi = 0$ и $\Phi_{\text{ост}}$, совпадающем по знаку со свободной составляющей потока. Этот случай включения представлен на рис. 2.90. Поток достигает

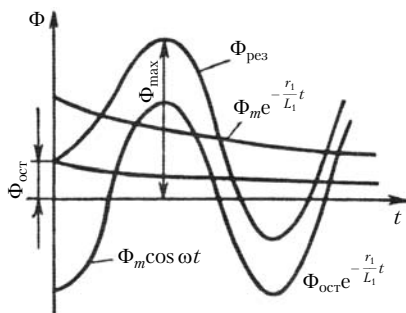


Рис. 2.90. Переходный процесс при включении трансформатора

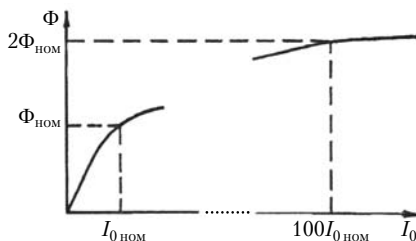


Рис. 2.91. Зависимость тока холостого хода трансформатора от магнитного потока

максимального значения примерно через полпериода после включения, и $\Phi_{\text{max}} \approx 1,8 \div 2,5 \Phi_m$.

Поток достигает 2,5-кратного значения Φ_m при условии, что остаточный поток равен $0,5 \Phi_m$, а свободная составляющая затухает очень медленно, что имеет место в мощных трансформаторах, у которых $r_1 \ll \omega L_1$. В трансформаторах малой мощности процесс включения протекает быстрее и сопровождается меньшими бросками тока.

Увеличение потока в 2—2,5 раза по сравнению с потоком Φ_m в реальном трансформаторе приводит к появлению тока,

в 100 и более раз превышающего ток холостого хода трансформатора (рис. 2.91). Обычно длительность переходного процесса невелика и броски тока затухают через несколько периодов.

Намагничивающий ток в силовых трансформаторах составляет 0,4—8% номинального тока трансформатора, поэтому кратковременные броски тока при включении не превышают 1,5—2,5 номинального тока трансформатора. Броски тока при включении не опасны для трансформатора, но необходимо настраивать защиту таким образом, чтобы не было ложных отключений трансформатора.

В трехфазных трансформаторах процесс включения протекает в каждой фазе со сдвигом на 120° . При тех же допущениях, что и для однофазного трансформатора, уравнения, полученные для однофазного трансформатора, остаются теми же самыми и для трехфазного трансформатора. Переходные процессы при коротком замыкании являются для трансформаторов опасными аварийными процессами. Короткие замыкания трансформаторов возникают в энергосистемах при повреждении изоляции, замыкании линии передач, при перенапряжениях и в результате ошибочных действий персонала.

При анализе процессов короткого замыкания в трансформаторе считают, что напряжение и частота на первичной обмотке остаются неизменными (сеть бесконечной мощности), замыкание происходит непосредственно на вторичных выводах, трансформатор ненасыщен (рис. 2.92).

Рассмотрим однофазный трансформатор с приведенным числом витков. Из дифференциальных уравнений трансформатора (2.1) следует:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \\ 0 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (2.135)$$

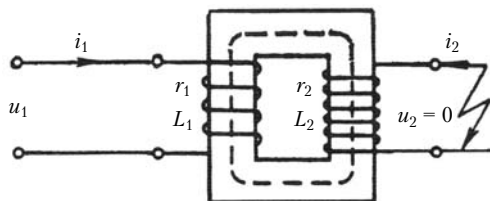


Рис. 2.92. Короткое замыкание однофазного трансформатора

Если пренебречь током холостого хода, приняв $i_1 = -i_2$ и вычесть друг из друга уравнения системы (2.135), получим

$$u_1 = i_1(r_1 + r_2) + (L_1 + L_2 - 2M)\frac{di_1}{dt}. \quad (2.136)$$

Так как $L_1 = M + L_{\sigma 1}$, а $L_2 = M + L_{\sigma 2}$, то имеем

$$u_1 = i_1 r_k + L_k \frac{di_1}{dt}, \quad (2.137)$$

здесь $r_k = r_1 + r_2$, $L_k = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$.

Уравнение (2.137) может быть получено также из схемы замещения трансформатора при коротком замыкании (см. рис. 2.17). Решение (2.137) имеет вид

$$i_1 = i_{1k} = i_{1y} + i_{1cb} = \sqrt{2} I_{1y} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + \sqrt{2} [I_1 \sin(\psi - \varphi) - I_{1y} \sin(\psi - \varphi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}, \quad (2.138)$$

где i_{1y} — мгновенное значение установившегося тока короткого замыкания, равное

$$\frac{U_{1m}}{z_k} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) = \sqrt{2} I_{1y} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k); \quad (2.139)$$

i_{1cb} — свободный ток, равный

$$\sqrt{2} [I_1 \sin(\psi - \varphi) - I_{1y} \sin(\psi - \varphi_k)] e^{-\frac{r_k}{L_k} t}, \quad (2.140)$$

здесь I_{1y} — действующее значение установившегося тока короткого замыкания, равное $\frac{U_1}{z_k}$; ψ — угол, характеризующий мгновенное значение напряжения в момент короткого замыкания; φ_k — фазный угол при коротком замыкании; I_1 — ток нагрузки в момент короткого замыкания; φ — фазный угол в момент короткого замыкания.

Для упрощения анализа процессов при коротком замыкании будем считать, что короткое замыкание произошло в трансформаторе при токе нагрузки $I_1 = 0$, т.е. при холостом ходе. Это не изменяет значительно процессы в трансформаторе, так как ток короткого замыкания во много раз превышает ток нагрузки. Для этого случая

$$i_{1k} = \sqrt{2} I_{1y} [\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - \sin(\psi - \varphi_k)]. \quad (2.141)$$

Из выражения (2.141) следует, что при $\psi = \varphi_k$ свободный ток отсутствует и ток короткого замыкания сразу становится равным установившемуся значению.

Наибольшее значение ток короткого замыкания приобретает при $\psi = \varphi_k + \pi/2$ (рис. 2.93). Максимальное значение тока короткого замыкания наступает через полпериода после короткого замыкания. Ударный ток короткого замыкания равен

$$I_{уд} = \alpha \sqrt{2} I_{1y}, \quad (2.142)$$

где $\alpha = 1,7 \div 1,8$ для трансформаторов большой мощности и $\alpha = 1,2 \div 1,3$ для трансформаторов небольшой мощности.

Установившийся ток короткого замыкания, считая трансформатор ненасыщенным, находим, используя относительные единицы, из отношения

$$\frac{I_{1y}}{I_{1ном}} = \frac{100}{u_k} \%. \quad (2.143)$$

Напряжение короткого замыкания определяет установившийся ток короткого замыкания и является важным показателем для характеристики динамических процессов в трансформаторе. Хотя переходные процессы в трансформаторе при коротком замыкании по существу затухают в течение пяти — семи периодов, короткие замыкания очень опасны для трансформатора. При $u_k\% = 5\%$ установившийся ток короткого замыкания в 20 раз, а ударный ток примерно в 50 раз превышают номинальный ток.

Во избежание выхода из строя трансформаторов при коротком замыкании они снабжаются быстродействующей защитой, отключающей их при коротком замыкании.

При коротком замыкании в трансформаторе в течение небольшого промежутка времени выделяется значительное количество тепла, что может привести к взрыву масла. Чтобы избежать повреждения бака трансформатора, предусматриваются предохранительный клапан и выхлопная труба, обеспечивающая выброс масла в специальную яму, расположенную вблизи фундамента трансформатора.

При коротком замыкании возникают огромные усилия, действующие на обмотки. Способность трансформатора

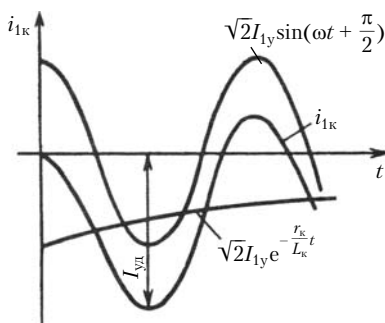


Рис. 2.93. Изменение токов в трансформаторе при коротком замыкании

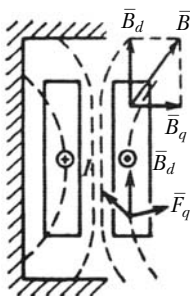


Рис. 2.94. Электромагнитные силы, действующие на обмотку трансформатора

выдерживать короткое замыкание определяется его электродинамической стойкостью.

Обмотки трансформатора, расположенные вокруг стержней магнитопровода, находятся в области поля рассеяния. Поэтому на единицу длины проводников действуют электромагнитные силы, равные произведению индукции поля рассеяния и тока (рис. 2.94):

$$F = Bi. \quad (2.144)$$

При коротком замыкании электромагнитные силы возрастают пропорционально квадрату тока, так как пропорционально току короткого замыкания увеличиваются потоки рассеяния. Если при номинальном режиме при токе 1000 А и индукции поля рассеяния 0,1 Тл электромагнитная сила, действующая на проводник, равна 1 Н/см, то при коротком замыкании она увеличивается почти в 1000 раз.

Чтобы обеспечить электродинамическую стойкость трансформатора, необходимо выполнять обмотки и магнитопровод таким образом, чтобы катушки не могли перемещаться и деформироваться.

Расчет механических усилий при переходных процессах затрудняется тем, что нельзя достаточно точно определить поток рассеяния и упругость сложной механической системы, которой является обмотка трансформатора. Поле рассеяния имеет продольную B_d и поперечную B_q составляющие (см. рис. 2.94). В различных точках обмотки B_d и B_q изменяются и, в зависимости от выполнения обмоток, продольная и поперечная составляющие поля рассеяния могут изменять направление по высоте обмотки.

Радиальные силы сжимают внутреннюю и растягивают внешнюю обмотки. Наиболее опасны осевые силы, возникающие под действием поперечной составляющей B_q , которые стремятся сдвинуть обмотки. Особенно опасно это для трансформаторов, у которых обмотки по длине несимметричны, что иногда приходится допускать при регулировании напряжения, когда отключается часть витков.

На рис. 2.95 показано распределение продольных и поперечных составляющих поля рассеяния и продольных и поперечных сил для concentрических обмоток равной высо-

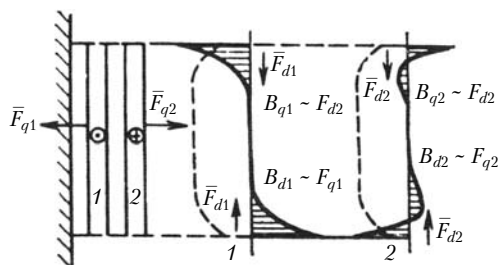


Рис. 2.95. Распределение продольных и поперечных сил в concentрических обмотках:

1 — в первичной; 2 — во вторичной

ты. Продольные силы F_{d1} и F_{d2} определяются током в обмотках (рассматривается трансформатор с приведенным числом витков) и поперечными составляющими индукции поля рассеяния B_{q1} и B_{q2} . Соответственно $F_{q1} \sim B_{d1}$, а $F_{q2} \sim B_{d2}$. Сложное распределение динамических усилий в обмотках трансформатора зависит от конструкции трансформатора, а точность расчетов определяется в основном расчетом полей рассеяния.

Электродинамические усилия пропорциональны квадрату тока, поэтому вибрации обмоток имеют двойную частоту по отношению к частоте сети.

При проектировании тщательно конструируется крепление обмоток. Детали и узлы крепления обмоток испытываются на прочность на специальных испытательных стендах.

В трехфазном трансформаторе при симметричном трехфазном коротком замыкании переходные процессы протекают в фазах со сдвигом на 120° . Формулы, полученные для однофазного трансформатора, справедливы для фазы трехфазного трансформатора.

Переходные процессы при несимметричных коротких замыканиях исследуют на ЭВМ. При этом решаются совместно уравнения напряжений трех фаз трансформатора.

Витковое короткое замыкание. При эксплуатации трансформаторов из-за повреждения изоляции витков может произойти короткое замыкание одного или нескольких витков внутри обмотки. При этом в двухобмоточном трансформаторе появляется третий короткозамкнутый контур и поврежденную фазу можно рассматривать как фазу трехобмоточного трансформатора.

Ток в замкнутых витках вторичной обмотки можно определить исходя из равенства МДС:

$$\frac{\omega_{2к}}{\omega_2} = \frac{I_{2ном}}{I_{2к}} \% \quad (2.145)$$

При определении токов в первичной обмотке в выражении (2.145) индекс «2» заменяется на «1».

Как следует из выражения (2.145), ток в замкнутых витках может в десятки и сотни раз превышать номинальный ток, что приводит к недопустимому местному нагреву, а огромные усилия, действующие на короткозамкнутые витки, приводят к тяжелой аварии и выходу из строя трансформатора.

При витковом коротком замыкании ток, потребляемый из сети, практически не увеличивается: это исключает возможность создания защиты трансформатора от витковых коротких замыканий. Единственной защитой трансформатора от витковых коротких замыканий являются правильный расчет изоляции, высокая технологическая культура завода-изготовителя и правильная эксплуатация трансформатора.

Переходные процессы в трансформаторах при перенапряжениях. Электромагнитное преобразование энергии в трансформаторах происходит при сравнительно низких частотах — 50—1000 Гц. При этих частотах схема замещения трансформатора состоит из активных и индуктивных сопротивлений.

При эксплуатации трансформаторы могут подвергаться воздействию высокочастотных напряжений прямоугольной формы в кратковременных импульсах, значительно превосходящих по амплитуде номинальное напряжение трансформатора. Перенапряжения в энергосистемах возникают при коммутационных операциях (отключении и включении линий передачи и трансформаторов), авариях и грозовых разрядах. Характерной формой волны перенапряжений является апериодическая волна (рис. 2.96, а). Начальный, крутонарастающий участок до U_m называют фронтом волны, а спадающий участок — спадом волны. При этом длительность фронта волны составляет несколько микросекунд, а вся волна перенапряжений действует десятки микросекунд. Наиболее опасна волна с прямоугольным фронтом (рис. 2.96, б). Она дает наибольшие пере-

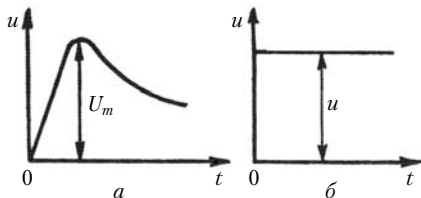


Рис. 2.96. Волны перенапряжений:

а — апериодическая; б — прямоугольная

ность фронта волны составляет несколько микросекунд, а вся волна перенапряжений действует десятки микросекунд. Наиболее опасна волна с прямоугольным фронтом (рис. 2.96, б). Она дает наибольшие пере-

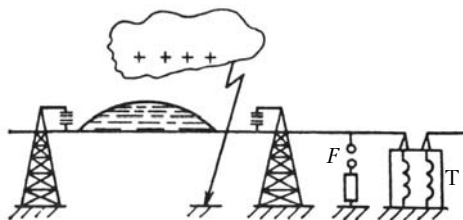


Рис. 2.97. Грозовые перенапряжения в линиях передачи и трансформаторах

напряжения, а при разложении прямоугольной волны на гармонические составляющие амплитуды высших гармоник максимальны. Волны с прямоугольным фронтом приходят к трансформаторам при грозовых перенапряжениях. При грозовых разрядах отрицательные заряды движутся вдоль линии со скоростью света (рис. 2.97). Многократно отражаясь от концов линии, волны, вызванные грозовыми разрядами, кратковременно создают амплитуды напряжений, в десятки раз превышающие номинальное напряжение трансформатора. Чтобы предохранить от пробоя изоляцию обмотки трансформатора Т, перед трансформатором устанавливают разрядники F (см. рис. 2.97) и усиливают изоляцию на входных витках обмотки. Вилитовые разрядники, состоящие из нелинейных сопротивлений, лишь уменьшают перенапряжения на трансформаторах, поэтому конструкция трансформатора должна предусматривать устойчивость трансформатора к перенапряжениям.

При исследовании переходных процессов при перенапряжениях схема замещения трансформатора наряду с распределенными индуктивностями и активными сопротивлениями имеет емкости между витками, катушками и землей (рис. 2.98). При высоких частотах емкостное сопротивление

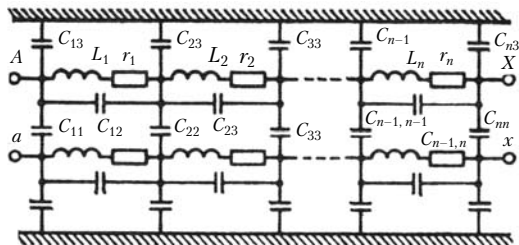


Рис. 2.98. Схема замещения для обмоток трансформатора при быстропотекающих переходных процессах

уменьшается и его необходимо учитывать. Индуктивное сопротивление трансформатора ωL становится столь большим, что можно считать его равным бесконечности.

Схема замещения трансформатора при перенапряжениях состоит из частичных емкостей между витками C_{12} , C_{13} для обмотки высшего напряжения, емкостей между витками обмотки и землей C_{13} , C_{23} , ..., C_{n2} и емкостей между витками обмоток высшего и низшего напряжений C_{11} , C_{22} , ..., C_{nn} . Такие же емкости имеются для обмотки низшего напряжения (для упрощения изображения на рис. 2.98 не обозначены). Достаточно сложная схема замещения рис. 2.98 не отражает всех емкостных связей. Надо иметь в виду, что и по длине витка емкости изменяются, так как в части витка, расположенной ближе к баку, и в части витка, расположенной в окне трансформатора, емкости различные.

Обычно переходные процессы при перенапряжениях рассматривают по более простой схеме (рис. 2.99). В этой схеме активные сопротивления обмоток приняты равными нулю, а емкости витков разделены на продольные емкости C_{1d} , C_{2d} , ..., C_{nd} и поперечные емкости C_{1q} , C_{2q} , ..., C_{nq} .

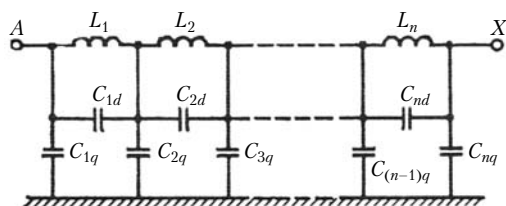


Рис. 2.99. Упрощенная схема замещения обмоток трансформатора при переходных процессах

Если считать, что при высоких частотах, которые имеют место при перенапряжениях, $\omega L \gg \frac{1}{\omega C}$, и ток, протекающий через индуктивности витков, равен нулю, то схема замещения еще более упростится и по ней более наглядно можно рассматривать переходные процессы при перенапряжениях (рис. 2.100).

Для схемы замещения рис. 2.100 продольная емкость

$$C_d = \frac{1}{\sum_i^n \frac{1}{C_{id}}}, \quad (2.146)$$

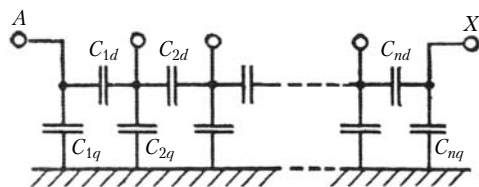


Рис. 2.100. Схема замещения, состоящая из емкостей

полная поперечная емкость

$$C_q = \sum_i^n C_{iq}. \quad (2.147)$$

При перенапряжениях волна с крутым фронтом заряжает продольные и поперечные емкости, не проходя по индуктивным сопротивлениям трансформатора. В первый момент переходного процесса трансформатор представляет собой входную емкость:

$$C_{\text{вх}} = \sqrt{C_d C_q}. \quad (2.148)$$

Входная емкость мощных высоковольтных трансформаторов достигает 10^{-9} — 10^{-11} . Волна с крутым фронтом в первый момент заряжает трансформатор, заряд трансформатора определяется входной емкостью $C_{\text{вх}}$, а на выходе трансформатора напряжение достигает двойного напряжения волны.

Чтобы рассмотреть процессы в трансформаторе при перенапряжении, обратимся к элементу емкостной цепи обмотки (рис. 2.101). Если принять длину обмотки равной единице, то напряжение на элементе схемы замещения dx будет du_x . Из соотношения

$$u = \frac{q}{C}, \quad (2.149)$$

где q — заряд на емкости; C — емкость, определяем, что на емкостях, включенных последовательно, заряд будет q_x , а на

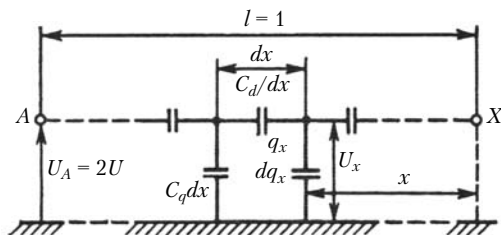


Рис. 2.101. Элемент емкостной цепи обмотки

пряжение $\frac{C_d}{dx}$. На емкостях, включенных параллельно, напряжение $\frac{C_d}{dx}$, а заряд dq_x . Из рис. 2.101 следует

$$u_x = \frac{1}{C_q} \frac{dq_x}{dx}; \quad (2.150)$$

$$\frac{du_x}{dx} = \frac{q_x}{C_d}. \quad (2.151)$$

Найдем q_x из выражения (2.151) и, подставив в выражение (2.150), получим

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} - \frac{C_q}{C_d} u_x = 0. \quad (2.152)$$

Решение уравнения (2.152) имеет вид

$$u_x = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x}, \quad (2.153)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}}. \quad (2.154)$$

В современных трансформаторах $\alpha = 5 \div 15$. Постоянные интегрирования A_1 и A_2 находятся из граничных условий.

В начальный момент времени электрические заряды и токи $i = \frac{dq}{dt}$ распределяются по продольным емкостям неравномерно, так как по мере подхода к концу обмотки все большие токи проходят через поперечные емкости. Поэтому через продольные емкости начальных витков проходят большие токи. В результате падение напряжения на продольных емкостях также распределяется неравномерно, уменьшаясь от начала к концу обмотки.

Из уравнения (2.152) для заземленной обмотки [9]

$$u_x = u_A \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha}. \quad (2.155)$$

Для обмотки с незаземленной нейтралью

$$u_x = u_A \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha}. \quad (2.156)$$

На рис. 2.102 показано начальное распределение напряжения по схеме замещения рис. 2.100 для обмотки с заземленной нейтралью, а на рис. 2.103 — с незаземленной нейтралью.

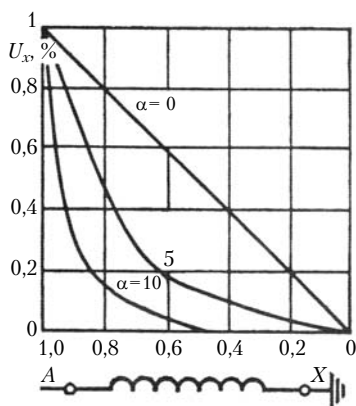


Рис. 2.102. Начальное распределение напряжения для обмотки с заземленной нейтралью

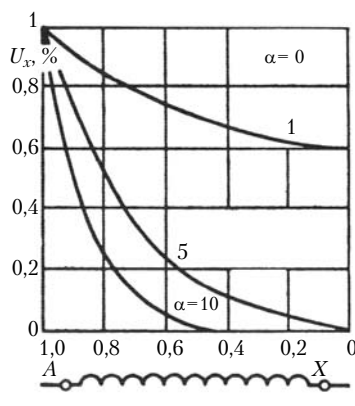


Рис. 2.103. Начальное распределение напряжения для обмотки с незаземленной нейтралью

Как очевидно из рис. 2.102 и 2.103, распределение начального напряжения при $\alpha > 5$ неравномерное. При волне с крутым фронтом на входных витках возникают значительные перепады напряжений, опасные для изоляции трансформатора. При $x = 1$ для обмотки с заземленной нейтралью (см. рис. 2.102)

$$\text{grad } u_x = \left[\frac{du_x}{dx} \right]_{x=1} = \alpha u_A \text{cth } \alpha. \quad (2.157)$$

Для обмотки с незаземленной нейтралью (см. рис. 2.103)

$$\text{grad } u_x = \left[\frac{du_x}{dx} \right]_{x=1} = \alpha u_A \text{th } \alpha. \quad (2.158)$$

При $\alpha > 3$ $\text{th } \alpha \approx \text{cth } \alpha = 1$, и для обоих случаев

$$\left[\frac{du_x}{dx} \right]_{x=1} = \alpha u_A. \quad (2.159)$$

В идеальном случае — при прямолинейном распределении напряжения $u_x = u_A x$ — крутизна постоянна и равна $\frac{du_x}{dx} = u_A$. В реальной обмотке, когда $\alpha \neq 0$, максимальная крутизна начального распределения напряжения в α раз больше, чем при $\alpha = 0$. Для трансформатора с $U_{\text{ном}} = 500$ кВ, имеющего 50 катушек в обмотке, при равномерном распределении на

катушку ложится 10 кВ. При $\alpha = 10$ на входной катушке будет начальное напряжение 100 кВ.

Следует отметить, что электротехническая промышленность в настоящее время освоила выпуск трансформаторов на напряжение 1150 кВ.

Рассмотрим период перехода от начального распределения напряжения к конечному. В этом переходе необходимо учитывать индуктивные сопротивления и рассматривать обмотку и ее элементы как колебательные контуры. Переход от начальной стадии к конечной происходит в виде высокочастотных колебаний, которые затухают из-за потерь в трансформаторе. При этом напряжения стремятся к установившимся значениям.

На рис. 2.104, 2.105 показано распределение напряжения (в относительных единицах) в различные моменты времени между начальным ($t = 0$) и конечным ($t = \infty$) распределениями напряжения для обмоток с заземленной и изолированной нейтралью.

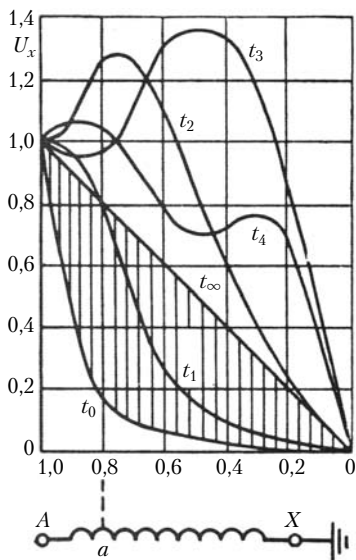


Рис. 2.104. Переходный процесс в обмотке с заземленным концом при воздействии прямоугольной волны

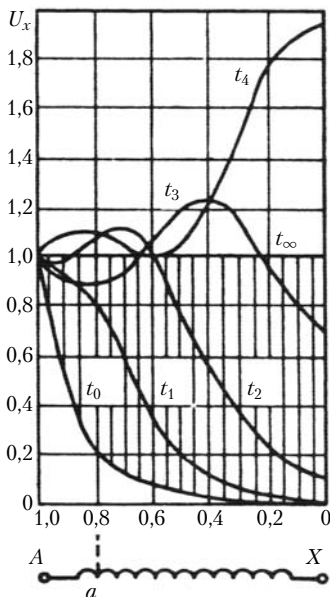


Рис. 2.105. Переходный процесс в обмотке с незаземленным концом при воздействии прямоугольной волны

Из кривых очевидно, что при проникновении прямоугольной волны в обмотку волна деформируется и, отражаясь от другого конца обмотки, накладывается на прямую волну, создавая сложную картину распределения напряжений во времени. На характер колебательных процессов влияют амплитуда и форма напряжений и параметры обмотки (ее индуктивные, емкостные и активные сопротивления). Разлагая падающую на обмотки трансформатора волну в гармонический ряд, можно представить, что бесконечный спектр гармоник воздействует на обмотки, вызывая резонансные колебания и весь сложный переходной процесс при перенапряжениях.

На рис. 2.106 и 2.107 представлено изменение напряжения на витках обмотки в точке a (см. рис. 2.104, 2.105) при прямоугольной бесконечно длинной волне и аperiodической волне конечной длины с крутым фронтом.

Как ни сложны переходные процессы при перенапряжениях, основные влияния их на работу трансформатора были выявлены еще в 1930-х гг. Основное воздействие перенапряжений принимают на себя входные витки и катушки обмотки, наиболее опасны волны с крутым фронтом.

При проектировании трансформаторов для обеспечения надежности работы необходимо усиливать изоляцию входных витков и катушек, а также стремиться к выравниванию начального распределения напряжения. Для этого надо увеличивать емкость входных витков и катушек.

Увеличение емкости достигается путем применения разомкнутых емкостных колец и электростатических экранов (рис. 2.108). Емкостные кольца изготавливаются из твердого изоляционного материала с металлизированной поверхностью. Для большего сближения начального и конечного распределений напряжений применяют электростатические экра-

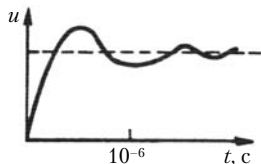


Рис. 2.106. Изменение напряжения в точке a (рис. 2.104) относительно земли при прямоугольной волне

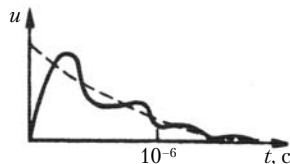


Рис. 2.107. Изменение напряжения в точке a (рис. 2.104) относительно земли при аperiodической волне с конечной длиной

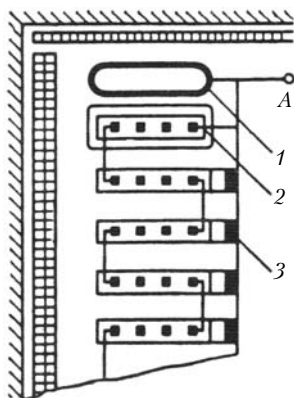


Рис. 2.108. Конструкция обмотки грозоупорного трансформатора:

1 — кольцо; 2 — экран; 3 — катушка с усиленной изоляцией

ны, представляющие собой разомкнутые изолированные кольца, охватывающие первые катушки и соединенные с входным концом обмотки.

Трансформаторы с емкостными кольцами и электрическими экранами называются нерезонирующими или грозоупорными трансформаторами. Нерезонирующие трансформаторы выдерживают грозовые и коммутационные перенапряжения и подключаются к воздушным и кабельным линиям.

Распределение начального и конечного напряжений и емкостная схема замещения нерезонирующего грозоупорного трансформатора показаны на рис. 2.109. Как следует из рисунка, увеличение емкости на входных витках приводит к более равномерному распределению напряжения между витками, что и повышает стойкость трансформатора к перенапряжениям.

Для выравнивания начального напряжения применяют также экранированные многослойные обмотки, специальную укладку в дисковых обмотках, шунтирование катушек обмотки высшего напряжения нелинейными сопротивлениями. В высоковольтных трехфазных трансформаторах с изолированной нейтралью во избежание перенапряжений

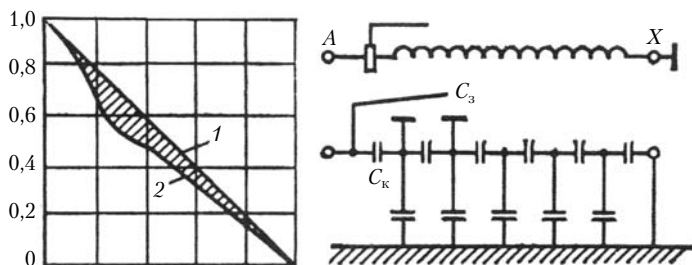


Рис. 2.109. Распределение напряжений относительно земли в обмотке грозоупорного трансформатора:

1 — конечное напряжение; 2 — начальное напряжение

у нулевой точки включают разрядник, реактор и конденсатор. Такое устройство обеспечивает изоляцию нейтрали и снимает перенапряжения.

В последнее время все больше используются переплетенные обмотки, в которых последовательное соединение витков отличается от последовательного расположения их в катушках в сочетании с емкостными кольцами.

На заводах-изготовителях трансформаторы подвергаются тщательным высоковольтным испытаниям. Масляные трансформаторы подвергаются испытаниям синусоидальным напряжением и импульсным испытаниям волной 1,5/40 (длительность 40 мкс, максимум напряжения поступает через 1,5 мс). Ниже приведены значения испытательных напряжений для трансформаторов.

Номинальное напряжение, кВ	Синусоидальное напряжение, кВ	Импульсное напряжение, кВ
6	25	60
35	85	200
110	200	480
220	325	750
500	680	1550

При эксплуатации трансформаторов нельзя допускать воздействия на их обмотки волн с амплитудой, превышающей допустимую.

Переходные процессы при перенапряжениях в автотрансформаторах качественно могут анализироваться так же, как в трансформаторах, хотя волновые процессы в автотрансформаторах имеют некоторые особенности.

2.18. Специальные трансформаторы

Конструкции трансформаторов весьма многообразны, но их объединяет общность физических процессов и математического описания электромагнитного преобразования энергии. Термин «специальные трансформаторы» условен, так как многие специальные трансформаторы выпускаются сериями в больших количествах (реакторы, печные и сварочные трансформаторы), а другие, хотя и выпускаются мелкими сериями, имеют важные применения. Рассмотрим некоторые специальные трансформаторы [14].

Трансформаторы частоты. Насыщенный нелинейный трансформатор в отличие от ненасыщенного является генератором гармоник, который условно показан в виде много-

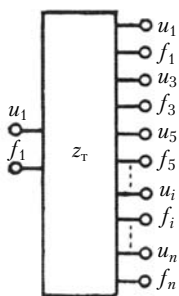


Рис. 2.110.
Насыщенный трансформатор z_T как генератор гармоник

полюсника на рис. 2.110. На выходе однофазного нелинейного трансформатора появляются высшие гармоники намагничивающего тока, а следовательно, и ЭДС, амплитуды которых при холостом ходе зависят от вида кривой намагничивания. При прямоугольном характере изменения $B = f(H)$ ЭДС высших гармоник: $E_3 = \frac{1}{3}E_1$, $E_5 = \frac{1}{5}E_1$, ..., $E_i = \frac{1}{i}E_1$, ..., $E_n = \frac{1}{n}E_1$. Четные гармоники появляются при наличии в потоке трансформатора постоянной составляющей (см. параграф 2.9).

Чтобы получить утроитель частоты, надо выделить 3-ю гармонику, а все остальные гармоники уменьшить. Этого можно достигнуть путем включения фильтров во вторичную обмотку. Схема с фильтрами грозоздка и имеет мягкую выходную характеристику. В утроителях частоты применяется схема из трех однофазных трансформаторов, включенных в открытый треугольник (рис. 2.111).

В схеме Y/Δ в обмотках трансформатора, соединенных в треугольник, наводятся токи 3-й гармоники, совпадающие по фазе во всех трех трансформаторах. Напряжение 1-й гармоники при соединении в открытый треугольник равно нулю. Емкость конденсатора C , включенного во вторичную обмотку, настраивается в резонанс по 3-й гармонике ($3\omega_1 L = \frac{1}{3\omega_1 C}$), чтобы компенсировать падение напряжения при нагрузке и сделать более жесткой внешнюю характеристику утроителя частоты.

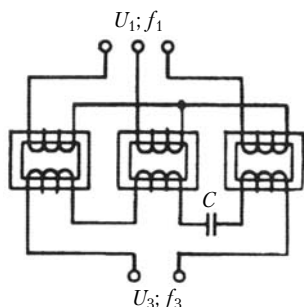


Рис. 2.111. **Утроитель частоты**

Статические умножители частоты имеют низкое использование материалов, так как в лучшем случае при прямоугольной характеристике намагничивания амплитуда 3-й гармоники составляет 33% амплитудного значения 1-й гармоники. Внешняя характеристика утроителя мягкая. Для лучшего использования ма-

териалов утроитель частоты применяют не только для получения 3-й гармоники, но и как трансформатор по 1-й гармонике. Для этого на магнитопроводе утроителя выполняется третья обмотка, соединенная по обычной схеме в звезду или треугольник.

В умножителях частоты гармоники влияют друг на друга, так как их происхождение связано с внутренним сопротивлением трансформатора z_T . Это, по существу, пространственные гармоники, хотя к трансформаторам представление о пространственном распределении МДС не подходит. Изменение нагрузки по одной гармонике сказывается на других гармониках.

Удвоение частоты получается в схеме трансформаторов с подмагничиванием (рис. 2.112). Однофазный трансформатор состоит из двух магнитопроводов и обмотки переменного тока w_1 , которая подключается к сети $U_1 f_1$, и охватывает оба магнитопровода. Обмотки подмагничивания w_2 расположены на разных магнитопроводах, и ЭДС 1-й гармоники в них компенсируются. Обмотки, в которых наводится двойная частота, расположены на двух магнитопроводах и включены так, что ЭДС 2-й гармоники складываются. Эти обмотки могут быть совмещены с обмоткой подмагничивания.

При наличии подмагничивания и насыщения магнитной системы во вторичной обмотке наряду с нечетными гармониками будут и четные. Среди них 2-я будет иметь наибольшую амплитуду, и в удвоителе частоты создаются благоприятные условия для возникновения 2-й гармоники напряжения. Как и в схеме утроения частоты, включение конденсатора благоприятно сказывается на внешней характеристике удвоителя частоты, так как конденсатор является источником реактивной мощности для 2-й гармоники и фильтром для гармоник более высокого порядка.

Включая выход удвоителя или утроителя частоты на вход другого удвоителя или утроителя, можно получить еще раз умножение частоты. Каскадные схемы двух удвоителей дают учетверение частоты, двух утроителей — удевятирование. Каскадное включение удвоителя и ут-

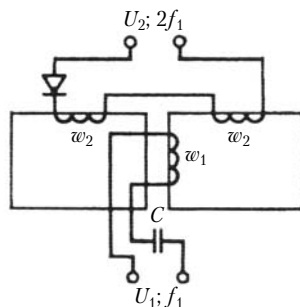


Рис. 2.112. Удвоитель частоты

роителя дает 6-ю гармонику. Обычно больше двух умножителей в каскад не соединяют.

Для целого ряда электромеханических систем требуется пониженная частота, например 25; $16^{2/3}$ Гц, поэтому представляет интерес создание статических делителей частоты.

Схемы удвоителей, утроителей и умножителей частоты необратимы. Если подводить напряжение к обмотке w_2 удвоителя частоты, то снять с обмотки w_1 напряжение с частотой в 2 раза меньшей не удастся. Это объясняется тем, что в основе работы умножителей лежит нелинейность характеристики намагничивания, а одна из особенностей нелинейной системы — различие взаимных индуктивностей между обмотками: $M_{12} \neq M_{21}$.

Для деления частоты применяется схема, показанная на рис. 2.112. В обмотках w_2 протекают пульсирующий и постоянный токи. Для работы делителя частоты имеет большое значение наличие второго нелинейного элемента — вентиля. Разложение тока и МДС вторичной обмотки в гармонический ряд дает субгармоники — гармоники с частотами ниже основной, которые трансформируются в нагрузку.

Электромагнитные делители частоты работают неустойчиво и применяются сравнительно редко.

Трансформаторы числа фаз. Хотя трехфазная система напряжений является основной в промышленности, широко используются одно-, двух- и шестифазные системы. Однофазные системы применяются в тяговых сетях и для питания

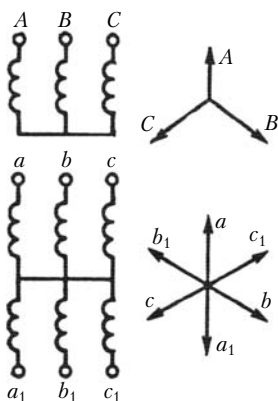


Рис. 2.113. Схема и векторная диаграмма трансформатора $3/6$ фаз

электропечных и нагревательных установок. Двухфазные системы используются в системах автоматического управления. Шестифазные системы применяются в преобразовательных установках, обеспечивая снижение пульсаций выпрямленного тока.

В мощных турбогенераторах для снижения тока в параллельной ветви обмотки статора применяется шестифазная обмотка. Шестифазная система напряжений преобразуется трансформатором, работающим в блоке с турбогенератором, в трехфазную систему.

Преобразование трехфазной системы напряжений в шестифазную производится по схеме рис. 2.113. Шестифазная система в трехстержневом трансформаторе получается за счет вторичной обмотки со средней точкой. Для получения из трехфазной системы 12-фазной при трехстержневом трансформаторе применяют схему звезда — двойной зигзаг (рис. 2.114). Возможно применение и других схем. Например, при шестистержневой конструкции трансформатора по схеме звезды со средней точкой преобразование $6/12$ аналогично преобразованию $3/6$.

В трансформаторах числа фаз, как и в обычных трансформаторах, энергия может передаваться из первичной обмотки во вторичную и из вторичной в первичную. Поэтому преобразователи числа фаз могут преобразовывать трехфазную систему напряжений в многофазную и многофазную в трехфазную.

Двухфазную систему из трехфазной получают путем применения двух однофазных трансформаторов (рис. 2.115),

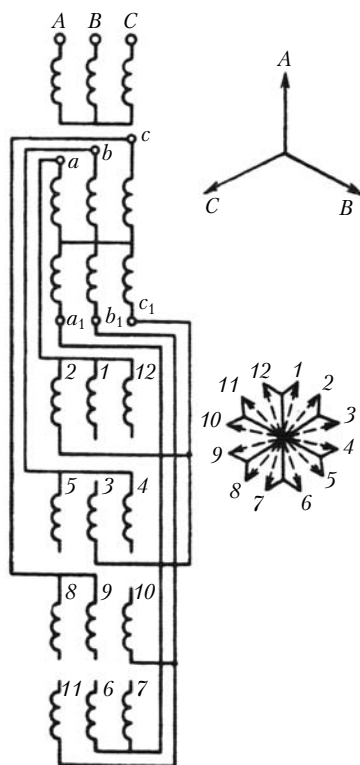


Рис. 2.114. Преобразование трехфазной системы напряжений в 12-фазную

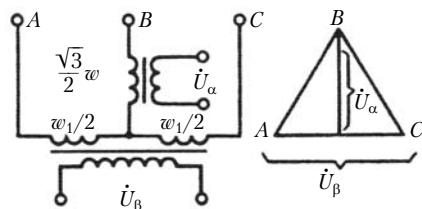


Рис. 2.115. Схема и векторная диаграмма преобразования трехфазной системы в двухфазную

включенных по несимметричной схеме. Число витков в одном трансформаторе в $\frac{3}{2}$ раз больше, чем в другом, и он имеет среднюю точку. Эта схема предложена в начале XX в. Г. Скоттом. Преобразование числа фаз иллюстрируется векторной диаграммой.

При холостом ходе в этой схеме двухфазные напряжения симметричны. Однако при нагрузке симметрия двухфазных напряжений искажается из-за того, что схема Скотта несимметричная — для фаз α и β внутреннее сопротивление источника энергии различное. Это является недостатком схемы преобразования числа фаз $\frac{3}{2}$.

Трансформаторы для электрических печей. На электротермию и электролиз расходуется значительная часть вырабатываемой в стране электроэнергии. Основным потребителем электроэнергии в этой отрасли являются дуговые электрические печи, работающие на одно- или трехфазном токе низшего напряжения. К высоковольтным сетям печи подключаются через понижающие трансформаторы со вторичным напряжением в сотни вольт. Мощность трехфазных печных трансформаторов для дуговых сталеплавильных печей достигает 25 МВ·А. Трансформаторы имеют ступенчатое регулирование напряжения от 110 до 420 В. Токи во вторичной обмотке достигают нескольких сотен килоампер.

Вторичная обмотка печных трансформаторов выполняется с большим числом параллельных ветвей, имеющих всего один-два витка. При концентрических обмотках для более удобного выполнения выводных концов обмотка низшего напряжения размещается снаружи, а высоковольтная — ближе к магнитопроводу.

Ввиду малого числа витков вторичной обмотки отводы и выводы печных трансформаторов имеют активные и реактивные сопротивления, близкие к сопротивлениям обмоток. При проектировании трансформаторов принимаются меры для снижения индуктивного сопротивления выводов. Для этой цели отводы выполняются чередующимися, когда в соседних отводах токи имеют встречное направление.

Печные трансформаторы непрерывно работают при переменной нагрузке, которая колеблется от режима холостого хода до режима короткого замыкания при несимметричном распределении нагрузки по фазам. Тяжелые условия работы печных трансформаторов требуют тщательного расчета электродинамических усилий и надежности трансфор-

маторов. Для ограничения токов короткого замыкания иногда в первичную обмотку включают реакторы.

В печных трансформаторах осуществляется регулирование напряжения в пределах $\pm 50\%$ номинального значения. Напряжение регулируется с первичной стороны, а также со вторичной путем переключения отдельных групп витков с параллельного на последовательное включение.

Сварочные трансформаторы. Зажигание и устойчивое горение дуги имеет место при напряжении 40–70 В. Для качественной сварки требуется крутопадающая внешняя характеристика трансформатора с ограниченным током короткого замыкания. Сварочные трансформаторы осуществляют понижение напряжения и обеспечивают необходимую внешнюю характеристику $U_2 f(I_2)$ со значительной индуктивностью в цепи нагрузки ($\cos \varphi = 0,4 \div 0,5$) (рис. 2.116).

Индуктивность цепи нагрузки при сварке должна регулироваться. Для этой цели применяются трансформаторы с включением в цепь нагрузки реактивной катушки с регулируемым воздушным зазором δ (см. рис. 2.116). Регулирование воздушного зазора обычно осуществляется вручную. Вместо схемы с реактивной катушкой применяются трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием. Увеличение индуктивного сопротивления рассеяния в сварочных трансформаторах достигается тем, что первичная и вторичная обмотки располагаются на разных стержнях. При увеличении тока нагрузки во вторичной обмотке поток вытесняется из стержня и напряжение на вторичной обмотке падает. При расположении обмоток на разных стержнях магнитная связь между обмотками уменьшается и ток нагрузки оказывает значительное влияние на режим работы трансформатора. В этом случае в трансформаторе проявляется реакция вторичной обмотки. В обычных трансформаторах реакция

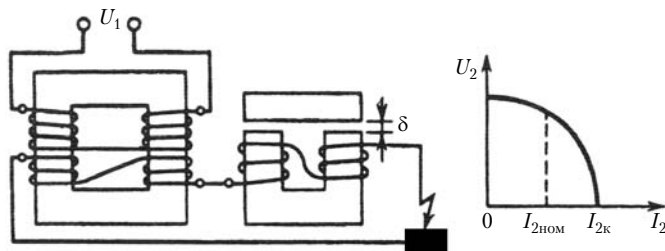


Рис. 2.116. Сварочный трансформатор с реактивной катушкой и его внешняя характеристика

вторичной обмотки сказывается менее заметно, так как обмотки располагаются друг над другом и коэффициент электромагнитной связи (см. формулу (2.2)) не изменяется. Изменение коэффициента электромагнитной связи при нагрузке обеспечивается в трансформаторах с магнитными шунтами. При насыщении шунта поток вытесняется в стержень и напряжение на вторичной обмотке увеличивается.

Трансформаторы для выпрямительных установок.

Трансформаторы, для которых нагрузкой являются цепи с нелинейными элементами в виде выпрямителей, тиристоров и транзисторов, работают в высокочастотных переходных

режимах, когда токи и напряжения во вторичной обмотке несинусоидальны и не уравниваются токами первичной обмотки. При этом непрерывно нарушается равенство МДС первичной и вторичной обмоток, а в трехфазных тиристорных преобразователях происходят несимметричные короткие замыкания. Неуравновешенные МДС подмагничивают магнитную систему, в обмотках трансформатора протекают несинусоидальные токи. Все это приводит к снижению мощности трансформатора по сравнению с трансформатором, работающим на линейную нагрузку.

Для снижения пульсаций увеличивают число фаз трансформатора. Для ограничения токов в шестифазных выпрямительных схемах применяют включение уравнивающей катушки УК между нейтралями двух трехфазных групп обмоток (рис. 2.117).

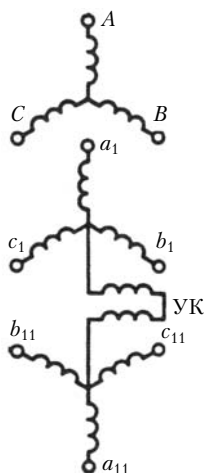


Рис. 2.117. Схема трансформатора с уравнивающей катушкой между нейтралями

Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частот применяются в устройствах связи, электроники и автоматики. Мощность таких трансформаторов может достигать десятков ватт, а частоты — до 100 кГц. При этом трансформаторы должны пропускать всю полосу частот усилителя. Такие трансформаторы называются микротрансформаторами. Минимальное искажение напряжений на первичной и вторичной обмотках достигается путем применения специальных сталей, снижения индукции и уменьшения потоков рассеяния.

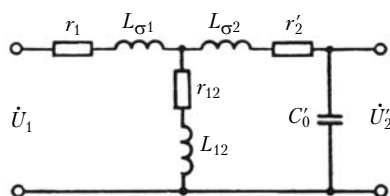


Рис. 2.118. Схема замещения высокочастотного трансформатора

Сложность расчета трансформаторов звуковых и ультразвуковых частот связана с необходимостью учета емкостных сопротивлений обмоток, которые при частоте 50 Гц малы.

Распределенные емкости приводятся к выходным выводам вторичной обмотки (рис. 2.118). На схеме замещения C'_0 — приведенная емкость трансформатора; r_{12} — активное сопротивление, эквивалентное потерям в стали и диэлектрике.

Среди микротрансформаторов особое место занимают импульсные трансформаторы или пик-трансформаторы, которые обеспечивают получение периодических импульсов напряжений — пиков напряжений (рис. 2.119).

Пик-трансформаторы выполняются двух модификаций: с магнитопроводом из стали с прямоугольной петлей гистерезиса или с магнитопроводом, имеющим насыщенный участок. В пик-трансформаторах при синусоидальном напряжении на первичной обмотке всплеск напряжения на вторичной обмотке получается при изменении потока. Когда сердечник насыщен, поток почти не изменяется и напряжение $U_2 = 0$, $e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \approx 0$, при изменении потока на вторичной обмотке наводятся пики напряжения (см. рис. 2.119). Для обеспечения синусоидальности тока и снижения перенапряжений в схему вводится активный резистор.

Реакторы применяются для ограничения токов короткого замыкания и в качестве фильтров токов высших гармоник. Конструкция реактора сходна с конструкцией трансформатора

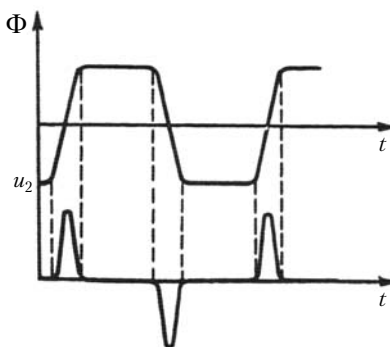


Рис. 2.119. Зависимости Φ и u_2 от времени в пик-трансформаторе

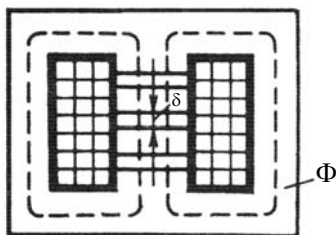


Рис. 2.120. Однофазный реактор с немагнитными зазорами

тора, только реактор имеет одну обмотку (рис. 2.120).

В последние годы в электроприводах усиленно внедрялись системы с преобразователями со статическими нелинейными элементами. Большая установленная мощность нелинейных элементов привела к появлению в энергосистемах токов высших гармоник, вредно влияющих на работу оборудования.

Для ограничения напряжений и токов высших гармоник применяются реакторы-фильтры.

В установившемся режиме в энергосистеме количество потребляемой электроэнергии (с учетом потерь) равняется энергии, выработанной на электростанциях. В переходных режимах энергия запасается в виде кинетической энергии вращающихся частей электрических машин или в магнитных полях электротехнических устройств. При уменьшении частоты сети или отключении электрических машин и трансформаторов запасенная в магнитных полях энергии преобразуется в активную энергию. Для ограничения токов короткого замыкания, регулирования реактивной мощности и улучшения характера протекания переходных процессов применяются реакторы.

Если в трансформаторе выполнить одну обмотку, получится реактивная катушка, которая будет запасать реактивную мощность в стальном магнитопроводе. Однако реактивная мощность, которая может быть сконцентрирована в 1 см^3 магнитопровода, невелика, а индуктивное сопротивление нелинейно зависит от напряжения. Поэтому наибольшее распространение получили реакторы с немагнитными зазорами (см. рис. 2.120).

Реактор с немагнитными зазорами обычно выполняется броневого типа с разделением зазора на несколько частей. Зазоры для увеличения динамической стойкости реактора заполняются гетинаксовыми прокладками. Энергия в таких реакторах в основном концентрируется в зазорах и определяется индукцией и объемом суммарного зазора. При коротких замыканиях в реакторе возникают усилия, стремящиеся уменьшить энергию системы, т.е. сжать зазоры, поэтому делают несколько зазоров и заполняют их прочны-

ми диэлектриками. Реакторы с зазорами имеют практически линейные характеристики.

Для ограничения токов короткого замыкания в сетях 6 и 10 кВ применяются бетонные реакторы (рис. 2.121). Бетонные реакторы изготавливают из концентрически расположенных витков круглого многожильного провода 1, который заливают в бетонные колонны 2. Обмотки рассчитывают на токи в тысячи ампер и усилия, достигающие сотен тысяч ньютон.

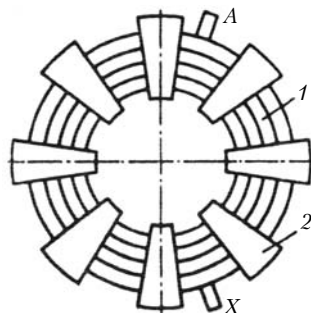


Рис. 2.121. Одна фаза бетонного реактора

Все металлические детали реактора выполняют из немагнитной стали.

Реакторы изготавливают также с регулируемым реактивным сопротивлением, что достигается путем переключения числа витков, подмагничивания магнитопровода и плавного изменения зазоров. Примером таких реакторов могут служить выпускаемые промышленностью однофазные заземляющие реакторы с естественным масляным охлаждением, которые имеют пять ступеней регулирования тока [9].

Сверхпроводящие индуктивные накопители. Развитие новых отраслей техники требует создания источников энергии 10^6 — 10^8 Дж с импульсами мощностью до 10^{13} Вт.

В сверхпроводящем индуктивном накопителе энергия может храниться сколь угодно долго практически без потерь. Накопитель разряжается, когда в сверхпроводящую цепь вводится активное сопротивление. Накопитель может заряжаться от маломощных источников энергии.

Принципиальная схема сверхпроводящего индуктивного накопителя показана на рис. 2.122. Накопитель состоит из выемной части — катушки — и криостата. Катушка 1 имеет секции, образующие параллельные ветви, разделенные перегородками 2. Катушку наматывают многожильным обмоточным кабелем со сверхпроводящими жилами из сплава ниобия и титана.

Секции и перегородки укрепляют на каркасе 3, который через трубу подвески 4 прикрепляют к крышке 5. Накопитель имеет высоковольтный ввод 6 и заземляющий ввод 7.

Криостат состоит из двух самостоятельных сосудов, образующих гелиевый объем 8 и азотную ванну 9. Оба сосуда

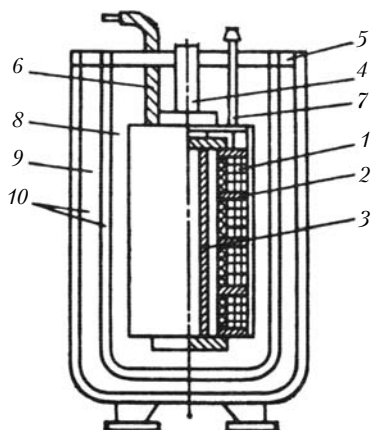


Рис. 2.122. Сверхпроводящий индуктивный накопитель

разделены вакуумными полостями 10.

Сверхпроводящие накопители имеют высокое значение индукции — до 5 Тл и среднюю плотность тока 10^4 – 10^5 А/см² при температуре 4–5 К.

Расчет усилий, действующих при разряде на витки и конструктивные части накопителя, представляет трудную задачу. Точность решения определяется расчетом магнитного поля в этой, на первый взгляд, простейшей магнитной системе. Для вычисления продольной и по-

перечной составляющих магнитного поля накопителя применяют ЭВМ, на которых составляющие поля в каждой точке рассчитывают в течение нескольких минут. Для расчета индуктивностей используют методы средних геометрических расстояний, конечных разностей, конечных элементов, интегральных уравнений.

2.19. Подход к проектированию трансформаторов

Глубокое знание теории электромагнитного преобразования энергии в трансформаторах необходимо для их проектирования и эксплуатации.

В техническом задании на проектирование трансформатора указываются: номинальная мощность; число фаз; частота; номинальные линейные напряжения первичной и вторичной обмоток; схема и группа соединений; способ охлаждения; характер нагрузки (продолжительный или повторно-кратковременный); потери холостого хода, ток холостого хода (%); напряжение короткого замыкания $u_k\%$ и потери короткого замыкания.

Расчет трансформатора производят в следующей последовательности.

После принципиального выбора конструкции магнитной системы, обмоток и системы охлаждения определяют линейные и фазные токи, а затем главные размеры трансформатора.

Главные размеры d и l трансформатора (рис. 2.123) определяют электромагнитную мощность трансформатора:

$$P_{\text{эм}} \sim d^2 l. \quad (2.160)$$

При проектировании широко используются опытные коэффициенты, полученные из практики электромашиностроения.

Чтобы определить внешний диаметр обмотки низшего напряжения, пользуются соотношением $D = \alpha d$, где $\alpha \approx 1,33 \div 1,45$ для трансформаторов с медной и $\alpha \approx 1,41 \div 1,54$ с алюминиевой обмотками.

Важное значение для распределения массы трансформатора между медью и сталью имеет соотношение

$$\beta = \frac{\pi d}{l} = \frac{\alpha \pi d}{l}, \quad (2.161)$$

которое для силовых трансформаторов изменяется в пределах от 1,1 до 3,5. Большим значениям β соответствуют трансформаторы с большей массой стали и меньшей массой меди, а меньшим значениям β — трансформаторы с большим объемом меди и меньшей массой стали. Из выражения (2.161) находят $l \approx (4,2 \div 4,6) \frac{d}{\beta}$ для медных и $l \approx (4,4 \div 4,8) \frac{d}{\beta}$ — для алюминиевых обмоток.

Далее выбирают электромагнитные нагрузки: B — индукцию в стержне и J — плотность тока. Обычно принимают $B = 1,4 \div 1,65$ Тл, а $J \approx 1,8 \div 2,8 \cdot 10^6$ А/м² (для трансформаторов с медными обмотками и масляным охлаждением). Для алюминиевых обмоток в трансформаторах с масляным охлаждением $J \approx 1,2 \div 1,8 \cdot 10^6$ А/м². Для сухих трансформаторов с медными обмотками $J \approx 1,2 \div 2,6 \cdot 10^6$ А/м², а с алюминиевыми $J \approx 0,8 \div 1,3 \cdot 10^6$ А/м².

Выбор заниженных электромагнитных нагрузок приводит к увеличению габаритов трансформатора и его стоимости. Завышенные электромагнитные нагрузки снижают энергетические показатели, увеличивают $\Delta u_{\text{к}}\%$. При проектировании стремятся в известной мере удовлетворить противоречивые требования и создать оптимальную конструкцию.

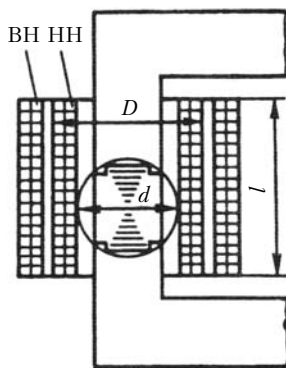


Рис. 2.123. Расчетная схема трансформатора

Правильный расчет изоляционных промежутков между обмотками и магнитопроводом имеет важное значение для надежной работы трансформатора. Промежуток между обмоткой низшего напряжения и ярмом принимается от 0,4 до 3 см в зависимости от мощности и напряжения трансформатора. Большие значения относятся к трансформаторам большей мощности, а также к трансформаторам с напряжением 35 кВ. Обмотки высшего напряжения 220 кВ должны иметь расстояние 16 см до стержня и 25 см до стенки бака.

При конструировании изоляции необходимо учитывать особенности процессов перенапряжения в трансформаторе.

Важное значение при проектировании трансформаторов, как и других электрических машин, имеет тепловой расчет. При тепловом расчете определяют температуры частей трансформатора и масла. Температура изоляции обмоток не должна превышать допустимой для класса изоляции, к которому относятся материалы изоляции обмоток.

Потери в трансформаторе выделяются в виде тепла в обмотках и магнитопроводе. ГОСТ 11677—85 допускает следующие наивысшие значения температуры для масляных трансформаторов: для обмоток 105°С; для магнитной системы (на поверхности) 115°С и для масла 95°С. При этом температура окружающего воздуха принимается равной 40°С. При превышении допустимой температуры на 8°С срок службы трансформатора снижается в 2 раза.

В масляных трансформаторах тепло, которое выделяется в активных частях трансформатора, отводится трансформаторным маслом к стенкам бака, а от стенок бака — к окружающему воздуху (рис. 2.124). В масляных трансформаторах

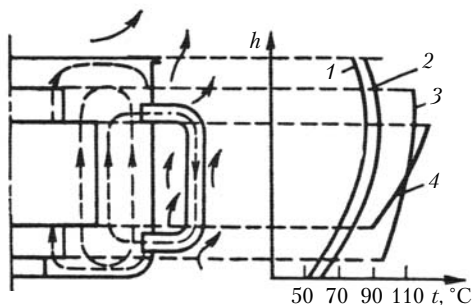


Рис. 2.124. Распределение температуры по высоте трансформатора:

1 — стенки бака; 2 — масло; 3 — магнитопровод; 4 — обмотка

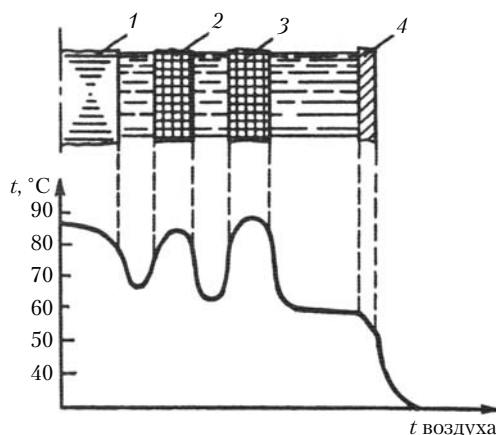


Рис. 2.125. Распределение температуры в горизонтальном сечении масляного трансформатора:

1 — стержень; 2 — обмотка НН; 3 — обмотка ВН; 4 — стенка бака

тепло от обмоток и магнитопровода передается маслу. Горячие слои масла поднимаются вверх, а холодные вдоль стенок бака опускаются вниз. Тепло конвекцией переносится к стенкам бака. Сквозь стенки бака тепло переносится теплопроводностью. Разница температур между стенками бака и воздуха составляет десятки градусов, поэтому от бака к воздуху тепло передается конвекцией и излучением.

На рис. 2.125 представлено распределение температуры в сечении трансформатора.

В сухих трансформаторах тепло отводится от активных частей путем конвекции.

При расчете тепловых процессов в трансформаторах принимают целый ряд упрощений и используют опытные данные по теплопередаче.

В установившемся режиме тепло, выделяемое в активных частях трансформатора, отводится от трансформатора, а превышение температуры не превосходит допустимого для класса изоляции, которая применена в трансформаторе.

Трансформаторостроение за последние десятилетия сделало большие успехи, и сегодня трансформаторы, выпускаемые в нашей стране, находятся на уровне мировых стандартов, а в области высоковольтных силовых трансформаторов мы занимаем лидирующие позиции.

Запорожский трансформаторный завод выпустил для линии передачи переменного тока самый мощный однофаз-

ный автотрансформатор АОДЦТ-667000/1150, в котором применена новая схема соединения обмоток, усовершенствована конструкция изоляции. Автотрансформатор транспортируется вместе с маслом железнодорожным транспортом грузоподъемностью 600 т.

Автотрансформатор имеет следующие данные.

Номинальная мощность, кВ·А:	
обмотки высокого и среднего напряжений	667 000
обмотки низшего напряжения	180 000
Номинальное напряжение обмоток, кВ:	
высшего напряжения	$1150/\sqrt{3}$
среднего напряжения	$500/\sqrt{3}$
низшего напряжения	20
Напряжение короткого замыкания, %	11,5
Ток холостого хода, %	0,35
Габариты, мм	15 640×7250×17 000
Масса, кг	580 000

В названиях трансформаторов и автотрансформаторов буквы и цифры имеют следующие обозначения:

А — автотрансформатор (для трансформаторов обозначение отсутствует);

Т — трехфазный, О — однофазный;

Р — расщепленная обмотка низшего напряжения;

С — вид охлаждения (табл. 2.2);

Т — трехобмоточный;

Н — выполнение одной из обмоток с переключением отвлений под нагрузкой.

Таблица 2.2

Вид охлаждения	Условное обозначение
<i>Сухие трансформаторы</i>	
Естественное воздушное (при открытом исполнении)	С
То же при защищенном исполнении	СЗ
То же при герметизированном исполнении	СГ
Воздушное с дутьем	СД
<i>Масляные трансформаторы</i>	
Естественное масляное	М
Масляное с дутьем и естественной циркуляцией масла	Д
То же с принудительной циркуляцией масла	ДЦ
Масляно-водяное с естественной циркуляцией масла	МВ
То же с принудительной циркуляцией масла	Ц

В числителе дроби после буквенных обозначений указывается номинальная мощность, а в знаменателе — класс напряжения обмотки высшего напряжения.

Трансформатор типа ТЦ-1250000/330 предназначен для работы в качестве главного повышающего трансформатора в блоке с турбогенератором 1000 МВт. Трансформатор ТЦ-1000000/500 предназначен для работы в блоке с турбогенератором 800 МВт. Эти трансформаторы имеют усовершенствованную конструкцию изоляции, направленную циркуляцию масла через обмотки низшего напряжения, высокоэффективную схему распределения потоков рассеяния. Контрольно-измерительная аппаратура допускает включение трансформатора в автоматизированную систему управления блоком.

Трансформаторы ОРЦ-417000/750 и ОРЦ-135000/500 предназначены для работы в блоке с генераторами в качестве повышающих трансформаторов на атомных и тепловых электростанциях. В конструкции трансформаторов применена усовершенствованная система шунтирования магнитного потока рассеяния; благодаря новым конструктивным решениям уменьшены главная и продольная изоляции. Применены фильтры тонкой очистки масла.

В табл. 2.3 приведены технические данные трансформаторов.

Масляный трехфазный трансформатор типа ТМ-250/10 имеет витой пространственный магнитопровод. При изготовлении трансформатора применяется технологический процесс вмотки обмоток на замкнутый магнитопровод. Серия трансформаторов обеспечивает снижение массы и габаритов на 5%. Расход электротехнической стали уменьшен на 8%, улучшены также энергетические характеристики трансформатора.

Масляные трансформаторы серий ТМ, ТДЦ, ТМТН, ТРДЦН, ТЦ общего назначения выпускаются на напряжения 10, 35, 110 и 220 кВ и мощности от 25 до 630 000 кВ·А.

Трансформаторы трехфазные сухие защищенные общего назначения серии ТСЗ предназначены для установки в помещениях. Они пожаробезопасны. Трансформаторы снабжены защитным кожухом, предохраняющим активные части от попадания внутрь посторонних предметов и не препятствующим поступлению охлаждающего воздуха.

В табл. 2.4 приведены данные для наименьшего и наибольшего по мощности трансформаторов серии.

Таблица 2.3

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВт·А	Номинальное напряжение обмоток, кВ		Схема и группа соединения	Напряжение короткого замыкания, %	Ток хол.ста, %	Габариты, мм, L×B×H	Масса, т
		высшей	низшей					
ТЦ-1250000/330	1 250 000	347	24	Y _н /Δ-11	14,0	0,75	14 100×5460×8700	635
ТЦ-1000000/500	1 000 000	525	24	Y _н /Δ-11	14,5	0,29	13 200×5550×10 200	570
ОРЦ-135000/500	135 000	525/3	13,8	Y _н /Δ-11	13,3	0,4	7300×2520×10 500	145
ТРДЦН-160000/220	160 000	230	11-11-38,5	Y _н /Δ-Y _н /Δ-11-11	12,0	0,5	6000×123 000×7550	236
ТДТН-40000/110	40 000	115	11	Y _н /Y _н /Δ-11-0-11	10,5	0,6	6750×4680×6250	81
ТРДН-25000/110	25 000	115	6,3	Y _н /Δ-Δ-11-11	10,5	0,65	5800×4200×5300	52

Таблица 2.4

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВт·А	$u_{к0}, \%$	Потери, Вт		$I_0, \%$	Габариты, мм, $L \times B \times H$	Масса, кг
			холостого хода	короткого замыкания			
Двухобмоточные на напряжение 660 В							
ТС3-10/0,66	10	4,5	90	280	7	650×700×440	150
ТС3-160/0,66	160	4,5	710	2060	2,3	1150×1150×680	800
Двухобмоточные на напряжения 10 и 15 В							
ТС3-160/10	160	5,5	700	2700	4,0	1700×1800×950	1400
ТС3-1600/10	1600	5,5	4200	16 000	1,5	3200×2650×1350	6500
ТС3-250/15	250	8,0	1100	4400	4,0	1850×2300×1200	2200
ТС3-1600/15	1600	8,0	4300	16 000	2,0	3200×2600×1350	6800

Трансформаторы малой мощности применяются для питания бытовых приборов, в радиотехнике, электроприводах и т.д. Их номенклатура весьма разнообразна. В табл. 2.5 содержатся данные однофазных сухих трансформаторов многоцелевого назначения серии ОСМ. Трансформаторы выпускаются для умеренного климата, в тропическом исполнении и холодостойкие. Мощность трансформаторов 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63 и 1 кВ·А; напряжение — 0,38 и 0,22 кВ.

Таблица 2.5

Тип трансформатора	Мощность, кВ·А	I_0 , %	$u_{кз}$, %	Габариты, мм, $L \times B \times H$	Масса, кг
ОСМ-0,063	0,063	24	12	84×115×95	1,4
ОСМ-1,00	1,00	18	2,5	165×210×185	14,4

Электропромышленность выпускает в большом разнообразии трансформаторы специального назначения для различных применений. Трансформаторный агрегат ЭОДЦНК-83300/220 предназначен для питания мощных ферросплавных электропечей. Подключается к сети 220 кВ. Обмотка высшего напряжения переплетенная, обмотка низшего напряжения выполнена из листовой меди. Переключающее устройство сделано в изолированном отсеке. Число ступеней регулирования 27. При мощности 26 700 кВ·А и вторичном напряжении 0,325 кВ ток в обмотке низшего напряжения 82 156 А. При мощности 18 690 кВ·А и напряжении на обмотке низшего напряжения 0,175 кВ ток во вторичной обмотке 106 800 А. Масса трансформатора 152 000 кг.

Для питания тиристорных приводов постоянного тока используется трансформатор ТСЗП-4000/10. После выпрямителя напряжение 825 В и ток 4000 А. Для питания тиристорных преобразователей электропривода экскаваторов выпускаются трансформаторы, способные выдерживать ударные и вибрационные нагрузки. Они рассчитаны на работу при повышенной запыленности и температуре -50°C .

Питание электробуровых установок осуществляется трансформатором ТМТБ-630/10. Особенности его работы являются одновременное питание электробура и лебедки подъема колонны бурильных труб, а также широкий диапазон регулирования напряжения питания электробура.

Трансформатор ТМПН-160/2,05 применяется для питания асинхронных двигателей напряжением 380 В погруж-

ных электронасосов для добычи нефти. При поддержании напряжения на асинхронном двигателе при увеличении глубины скважин предусматривается ступенчатое регулирование напряжения: 2200—2125—2050—1975—1900 В. Масса трансформатора 1100 кг.

Для питания пониженным напряжением машин контактной сварки предназначен трансформатор ОСВК-25/75. Номинальный длительный ток обмотки низшего напряжения 9000 А. Номинальный ток в повторно-кратковременном режиме 25 000 А. Число ступеней регулирования восемь. Масса 110 кг.

В целях электроснабжения промышленных предприятий, электрификации сельского хозяйства выпускаются комплектные трансформаторные подстанции, которые состоят из силового трансформатора и распределительного устройства со стороны низшего и высшего напряжений. Для питания двигателей в угольных шахтах выпускаются взрывозащищенные трансформаторные подстанции.

Обеспечение надежной работы энергосистем осуществляется различными реакторами. Шунтирующие реакторы предназначены для компенсации зарядной мощности линии и ограничения перенапряжений после сброса нагрузки или короткого замыкания, обеспечения непосредственного присоединения линии к источнику питания. Применение в электроприводах тиристорных преобразователей приводит к появлению в сетях высших гармонических. Для фильтров высших гармоник на стороне переменного тока в системах электроснабжения выпускаются реакторы фильтровые и сглаживающие. В новой серии сглаживающих реакторов используется одностержневая конструкция без ярма. Стержень выполнен из листов стали одной ширины, которые собираются в отдельные пакеты.

Сглаживающий реактор ФРОС-65/05 имеет номинальный ток 250 А, индуктивность 1,5 мГн, массу 82 кг.

Работу преобразовательных подстанций постоянного тока 1500 кВ обеспечивает реактор РОЛДЦ-1200/4/800. Условная мощность при частоте 50 Гц 1800 кВ·А. Номинальный постоянный ток 1200 А, индуктивность 4 Гн, класс напряжения 800 кВ, транспортная масса 396 т. Для этих подстанций выпускаются также фильтровые реакторы и высокочастотные анодные реакторы. Реакторы в трансформаторном производстве время занимают значительное место.

Рассмотренные изделия трансформаторных заводов хотя и не исчерпывают всей номенклатуры, свидетельствуют о разнообразии выпускаемой электротехнической промышленностью продукции.

Глава 3

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

3.1. Режимы работы и области применения асинхронных машин

Асинхронные машины получают из обобщенной машины (см. рис. 1.25), когда $\omega_p \neq \omega_c$. При этом поля статора и ротора неподвижны относительно друг друга, так как частоты токов в роторе и статоре связаны между собой соотношением $f_2 = f_1 s$, где f_1 и f_2 — соответственно частоты статора и ротора. При этом s — скольжение или относительная угловая скорость (частота вращения)

$$s = \frac{\omega_c \pm \omega_p}{\omega_c}. \quad (3.1)$$

В формуле (3.1) угловая скорость ω_p имеет положительный знак в генераторном и тормозном режимах, в двигательном режиме ω_p имеет отрицательный знак.

В асинхронных (несинхронных) машинах частота вращения ротора не равна частоте вращения поля в воздушном зазоре ($\omega_p \neq \omega_c$). Механическая частота вращения ротора асинхронных машин в установившемся режиме может быть ниже и выше синхронной частоты вращения поля, при этом ротор может вращаться в сторону, противоположную вращению поля.

В зависимости от частоты вращения и направления вращения ротора по отношению к полю различают четыре режима работы асинхронных машин (рис. 3.1). Когда $0 < \omega_p < \omega_c$, имеет место двигательный режим, при $\omega_c < \omega_p < +\infty$ — генераторный режим. В этом режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле, но с большей частотой вращения. В тормозном режиме ротор асинхронной машины вращается в сторону, противоположную вращению поля. Когда асинхронная машина эксплуатируется при неподвижном роторе ($\omega_p = 0$), имеет место трансформаторный режим работы асинхронной машины (рис. 3.1, а).

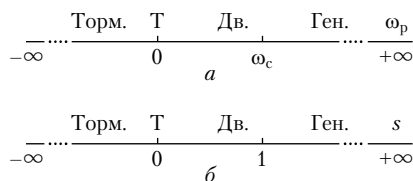


Рис. 3.1. Режимы работы асинхронной машины:

а — на шкале частоты вращения; *б* — на шкале скольжения

В теории асинхронных машин широко применяется понятие скольжения — относительной частоты вращения (см. формулу (3.1)). Режимы работы асинхронной машины в функции скольжения представлены на рис. 3.1, б. В двигательном режиме при $0 < s < 1$ асинхронная машина преобразует электрическую энергию в механическую. В генераторном режиме, когда $0 > s > -\infty$, ротор асинхронной машины вращается в сторону вращения поля с частотой, большей синхронной. При этом механическая энергия преобразуется в электрическую. В тормозном режиме механическая и электрическая энергии преобразуются в тепло. Этот режим, как правило, может быть кратковременным и используется для быстрого останова. Трансформаторный режим, когда $s = 1$, используется для регулирования амплитуды и фазы напряжения.

Асинхронные машины получили наибольшее распространение как двигатели. Это основной двигатель, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Только асинхронных двигателей единых серий мощностью от 0,06 до 400 кВт в нашей стране ежегодно выпускается несколько миллионов.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность асинхронных двигателей — несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до сотен ватт. Частота вращения двигателей общего назначения — от 3000 до 500 об/мин.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко. Для создания поля в зазоре асинхронной машины необходима реактивная мощность, которая забирается из сети или от других источников реактивной мощности. Асинхронные двигатели не могут работать с $\cos \varphi = 1$. Это существенный недостаток асинхронных машин, ограничивающий их применение в генераторном режиме.

При электромеханическом преобразовании энергии в асинхронных машинах, как и в других машинах, происходит преобразование энергии в тепло. Электрические потери в роторе асинхронной машины пропорциональны скольжению:

$$P_{\text{э2}} = P_{\text{эм}} s, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность — мощность в воздушном зазоре машины.

Чтобы большая часть электрической энергии преобразовывалась в механическую, асинхронные машины используются в электроприводах, где допустимо небольшое скольжение ($s = 1 \div 4\%$). При глубоком скольжении ($s = 10 \div 50\%$) асинхронные машины используются редко, так как в этом случае большая часть мощности, забираемой из сети, преобразуется в тепло, что приводит к низкому КПД и увеличению габаритов асинхронной машины из-за трудностей, связанных с отводом тепла от активных частей машины.

Наличие в роторе потерь, пропорционально зависящих от скольжения, — одна из особенностей асинхронных машин, обуславливающих их отличие от других типов электрических машин.

Если обмотки ротора представляют собой замкнутые контуры, то при скольжении $s = 1$ вся мощность, поступающая на ротор, преобразуется в тепло. При скольжении $s = 0$ мощность из сети на ротор не поступает. При скольжениях, отличных от 0 и 1, электромагнитная мощность преобразуется в двигательном режиме в механическую мощность и в тепло, а в генераторном режиме — в электрическую и в тепло.

В конструктивном исполнении асинхронные двигатели — наиболее простые, они получили наибольшее распространение.

3.2. Математическое описание процессов преобразования энергии в асинхронных машинах

Чтобы получить уравнения асинхронной машины, рассмотрим идеализированную двухфазную асинхронную машину. В идеализированной машине в воздушном зазоре — круговое поле, а высшие гармоники отсутствуют. Рассмотрим двухфазную симметричную машину с одинаковым числом витков на статоре и роторе $w_{\alpha}^s = w_{\beta}^s = w_{\alpha}^r = w_{\beta}^r$ (рис. 3.2).

Уравнения асинхронной машины получаются из уравнений обобщенной машины (1.100). Для неподвижного относительно статора наблюдателя в системе координат α, β дифференциальные уравнения асинхронной машины с замкнутой накоротко обмоткой ротора $u_\alpha^r = u_\beta^r = 0$ имеют следующий вид:

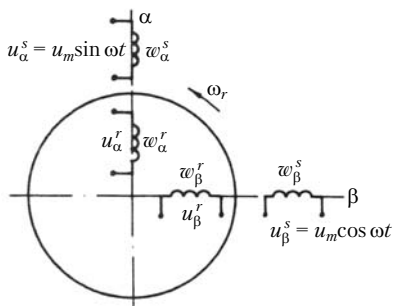


Рис. 3.2. Модель идеализированной асинхронной машины

$$\begin{pmatrix} u_\alpha^s \\ 0 \\ 0 \\ u_\beta^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\alpha^s + \frac{d}{dt}L_\alpha^s & \frac{d}{dt}M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}M & r_\alpha^r + \frac{d}{dt}L_\alpha^r & L_\beta^r\omega_p & M\omega_p \\ -M\omega_p & -L_\alpha^r\omega_p & r_\beta^r + \frac{d}{dt}L_\beta^r & \frac{d}{dt}M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt}M & r_\beta^s + \frac{d}{dt}L_\beta^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \\ i_\beta^s \end{pmatrix}; \quad (3.3)$$

$$M_{эм} = \frac{m}{2} M (i_\beta^s i_\alpha^r - i_\alpha^s i_\beta^r), \quad (3.4)$$

где u_α^s, u_β^s — напряжения на обмотках статора; $i_\alpha^s, i_\alpha^r, i_\beta^r$ и i_β^s — токи в обмотках статора и ротора по осям α и β ; $r_\alpha^s, r_\alpha^r, r_\beta^r$ и r_β^s — активные сопротивления обмоток статора и ротора по осям α и β ; $L_\alpha^s, L_\alpha^r, L_\beta^r$ и L_β^s — полные индуктивности обмоток статора и ротора по осям α и β ; m — число фаз.

Полные индуктивности

$$L = M + L_\sigma,$$

где M — взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора по осям α и β ; L_σ — индуктивность рассеяния обмотки.

Уравнения (3.3) и (3.4) описывают процессы преобразования энергии в асинхронных машинах в переходных и установившихся режимах.

Уравнения напряжения в непреобразованной записи из (3.3) выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^s = r_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + \frac{d}{dt} L_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + \frac{d}{dt} M i_{\alpha}^r, \\ 0 = \frac{d}{dt} M i_{\alpha}^s + r_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + \frac{d}{dt} L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + L_{\beta\omega p}^r i_{\beta}^r + M_{\omega p} i_{\beta}^s, \\ 0 = -M_{\omega p} i_{\alpha}^s - L_{\alpha\omega p}^r i_{\alpha}^r + r_{\beta}^r i_{\beta}^r + \frac{d}{dt} L_{\beta}^r i_{\beta}^r + \frac{d}{dt} M i_{\beta}^s, \\ u_{\beta}^s = \frac{d}{dt} M i_{\beta}^r + r_{\beta}^s i_{\beta}^s + \frac{d}{dt} L_{\beta}^s i_{\beta}^s. \end{cases} \quad (3.5)$$

Уравнения для неподвижных обмоток записываются так же, как для трансформаторов, а в напряжениях вращающихся обмоток есть трансформаторные ЭДС и ЭДС вращения (3.3)

$$\begin{aligned} & L_{\beta\omega p} i_{\beta}^r + M_{\omega p} i_{\beta}^s; \\ & -M_{\omega p} i_{\alpha}^s - L_{\alpha\omega p}^r i_{\alpha}^r. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Уравнения (3.3) и (3.4) записаны для псевдонеподвижных обмоток ротора при условии сохранения тех же токов, потерь и реактивной мощности, что и в реальной вращающейся машине. Напряжения на обмотках статора и ротора машины уравниваются трансформаторными ЭДС и ЭДС вращения (см. уравнения (3.5)).

Дифференциальные уравнения (3.3), (3.4) не имеют аналитического решения, так как содержат произведения переменных (3.4). Поэтому возможны приближенные решения, и для исследования этих уравнений широко применяются ЭВМ. Чтобы получить из дифференциальных уравнений асинхронной машины (3.3) и (3.4) комплексные уравнения, описывающие установившиеся режимы работы асинхронной машины, надо заменить оператор дифференцирования $\frac{d}{dt} \Rightarrow j\omega$. Уравнения напряжений асинхронной машины в установившемся режиме из (3.3) имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\alpha}^s = r_{\alpha}^s \dot{i}_{\alpha}^s + j\omega L_{\alpha}^s \dot{i}_{\alpha}^s + j\omega M \dot{i}_{\alpha}^r, \\ 0 = j\omega M \dot{i}_{\alpha}^s + r_{\alpha}^r \dot{i}_{\alpha}^r + j\omega L_{\alpha}^r \dot{i}_{\alpha}^r + L_{\beta\omega p}^r \dot{i}_{\beta}^r + M_{\omega p} \dot{i}_{\beta}^r, \\ 0 = -M_{\omega p} \dot{i}_{\alpha}^s - L_{\alpha\omega p}^r \dot{i}_{\alpha}^r + r_{\beta}^r \dot{i}_{\beta}^r + j\omega L_{\beta}^r \dot{i}_{\beta}^r + j\omega M \dot{i}_{\beta}^s, \\ \dot{U}_{\beta}^s = j\omega \dot{i}_{\beta}^r + r_{\beta}^s \dot{i}_{\beta}^s + j\omega L_{\beta}^s \dot{i}_{\beta}^s. \end{cases} \quad (3.7)$$

Уравнения напряжений и уравнение движения в установившемся режиме могут рассматриваться независимо друг от друга, поэтому проанализируем только уравнения напряжения.

Так как рассматривается симметричная машина, целесообразно параметры обмоток статора обозначить $L_s = L_\alpha^s = L_\beta^s$ и $R_s = r_\alpha^s = r_\beta^s$, а ротора $L_r = L_\alpha^r = L_\beta^r$ и $R_r = r_\alpha^r = r_\beta^r$. Переходя в установившемся режиме к индуктивным сопротивлениям, получаем

$$\begin{aligned} j\omega L_s &= j\omega M + j\omega L_\sigma^s; \\ j\omega L_r &= j\omega M + j\omega L_\sigma^r, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где ωL_s и ωL_r — полные индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; $x_0 = \omega M$ — индуктивное сопротивление взаимной индукции; $x_s = \omega L_\sigma^s$, $x_r = \omega L_\sigma^r$ — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора.

От четырех уравнений напряжений (3.7) при анализе установившихся процессов в асинхронной машине можно перейти к двум, если обратиться к обобщающим векторам напряжений, токов и сопротивлений (см. параграф 1.14). Введя обозначения для результирующих векторов напряжений статора и ротора \dot{U}_s, \dot{U}_r , токов \dot{I}_s и \dot{I}_r , а также для сопротивлений R_s, R_r и индуктивностей L_s, L_r , из уравнения (3.7) получим

$$\begin{cases} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + j\omega L_s \dot{I}_s + j\omega M \dot{I}_r, \\ 0 = R_r \dot{I}_r + j\omega L_r \dot{I}_r + j\omega M \dot{I}_s - jM\omega_p \dot{I}_s - jL_r\omega_p \dot{I}_r. \end{cases} \quad (3.9)$$

Считая, что мощность в асинхронном двигателе передается от обмотки статора к обмотке ротора, и учитывая, что $x_0 = \omega M$, $x_s = \omega L_\sigma^s$, $x_r = \omega L_\sigma^r$ и относительная частота вращения $v = \frac{\omega_p}{\omega_c}$, имеем

$$\begin{cases} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_r, \\ 0 = -R_r \dot{I}_r - jx_r \dot{I}_r - jx_0 \dot{I}_r - jx_0 \dot{I}_s v + jx_0 \dot{I}_r v + jx_r \dot{I}_r v. \end{cases} \quad (3.10)$$

Вводя замену переменных $\dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r$, из уравнений (3.10) получаем

$$\begin{cases} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_0, \\ 0 = -R_r \dot{I}_r - jx_r \dot{I}_r (1 - v) - jx_0 \dot{I}_r (1 - v). \end{cases} \quad (3.11)$$

Используя в уравнениях (3.11) выражение для скольжения $s = \frac{\omega_c - \omega_p}{\omega_c} = 1 - v$, находим

$$\begin{cases} \dot{U}_s = R_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s + jx_0 \dot{I}_0, \\ 0 = -R_r \dot{I}_r - jx_r \dot{I}_r s - jx_0 \dot{I}_r s. \end{cases} \quad (3.12)$$

Далее, вводя ЭДС при холостом ходе $\dot{E}_0 = -jx_0 \dot{I}_0$, переходим к уравнениям асинхронной машины в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = -\dot{E}_0 + R_s \dot{I}_s + jx_s \dot{I}_s, \\ 0 = \dot{E}_0 s - R_r \dot{I}_r - jx_r \dot{I}_r s, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r. \end{cases} \quad (3.13)$$

Электродвижущая сила \dot{E}_0 , или, как ее иногда называют, противо-ЭДС, уравнивает напряжение сети. Когда машина подключена к сети при нагрузке на валу, равной нулю, $\dot{U}_s \approx \dot{E}_0$ и в обмотках машины токи близки к нулю.

При дальнейшем рассмотрении теории установившихся режимов асинхронной машины целесообразно пользоваться сопротивлениями статора и ротора

$$z_s = R_s + jx_s; \quad z_r = R_r + jx_r.$$

Поделив второе уравнение в (3.13) на s , получим уравнения асинхронной машины

$$\begin{cases} \dot{U}_s = -\dot{E}_0 + \dot{I}_s z_s, \\ 0 = \dot{E}_s - \dot{I}_r \frac{R_r}{s} - jx_r \dot{I}_r, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r. \end{cases} \quad (3.14)$$

Так как $\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \frac{1-s}{s}$, то подставив это выражение в уравнение (3.14), получим уравнения асинхронной машины, похожие на уравнения трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = -\dot{E}_0 + \dot{I}_s z_s, \\ 0 = \dot{E}_s - \dot{I}_r z_r - \dot{I}_r R_r \frac{1-s}{s}, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_s + \dot{I}_r. \end{cases} \quad (3.15)$$

Уравнения (3.15) описывают процессы электрохимического преобразования энергии в асинхронных машинах в установившихся режимах. Для них предложены векторные диаграммы, круговые диаграммы и схемы замещения асинхронных машин. По уравнениям (3.15) теорию асинхронной машины можно рассматривать как теорию трансформатора, во вторичную обмотку которого вводится активное сопротивление $R_r \frac{1-s}{s}$. Активная мощность, которая выделяется на этом сопротивлении, пропорциональна полезной мощности на валу машины.

3.3. Конструкции асинхронных машин

Можно без преувеличения сказать, что промышленное производство приводится в движение асинхронными двигателями, которые выпускаются едиными сериями в огромных количествах. Основная серия асинхронных машин 4А включает в себя двигатели от 0,4 до 400 кВт. Выпускаются высоковольтные машины в виде единой серии А4 на мощности свыше 400 кВт. Разработана единая серия асинхронных машин АИ, АИР, 5А и РА.

Конструкции асинхронных машин делятся на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Наибольшее распространение получили двигатели с короткозамкнутым ротором, которые в серии 4А выполняются на все мощности, включая 400 кВт.

Обмотки короткозамкнутых роторов выполняются литыми из алюминия или его сплавов. При заливке одновременно отливаются стержни, лежащие в пазах, и короткозамыкающие кольца с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками и штырями для крепления балансировочных грузиков (рис. 3.3).

Короткозамкнутые роторы крупных машин и специальных асинхронных машин с улучшенными пусковыми характеристиками выполняются сварными. Стержни ротора из меди или латуни привариваются к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляются стержни обмотки.

Асинхронные машины с фазным ротором имеют на роторе обмотку из круглых или прямоугольных проводов, которая выполняется так же, как и обмотка статора.

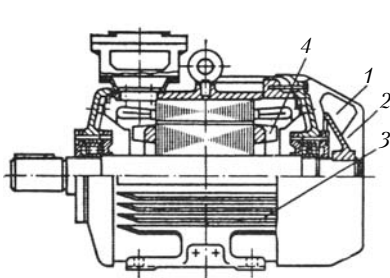


Рис. 3.3. Асинхронный двигатель 4А250 (степень защиты 1Р44)

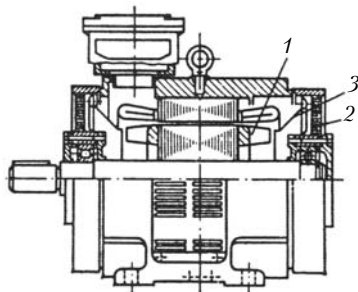


Рис. 3.4. Асинхронный двигатель 4АН250 (степень защиты 1Р23)

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии 4А можно разделить на две разновидности по степени защиты и способу охлаждения. Машины закрытые, защищенные от попадания внутрь ее брызг любого направления и предметов диаметром более 1 мм, снабжены вентилятором для внешнего обдува (см. рис. 3.3). По ГОСТ 14254–96 это исполнение имеет обозначение 1Р44.

Второй разновидностью конструкции являются машины с исполнением по степени защиты 1Р23 (рис. 3.4). В этих машинах обеспечивается защита от возможности соприкосновения пальцев рук и твердых предметов диаметром более 12,5 мм с токоведущими вращающимися частями машины. Исполнение 1Р23 предусматривает защиту от попадания внутрь машины капель, падающих под углом 60° к вертикали. Иногда такое исполнение называют каплезащищенным.

Наружный обдув в закрытых двигателях осуществляется вентилятором 1 (см. рис. 3.3), окруженным кожухом 2. Для улучшения теплоотдачи станина 3 двигателя имеет продольные радиальные ребра. Вентиляционные лопасти ротора 4 перемешивают воздух внутри машины, отводя тепло от более нагретых лобовых частей обмотки.

В двигателях защищенного исполнения со степенью защиты 1Р23 применена двусторонняя симметричная радиальная система вентиляции (см. рис. 3.4). Воздух попадает в машину через отверстия в щитах, а выходит через отверстия в станине. Напор воздуха внутри машины создается лопатками 1, отлитыми вместе с короткозамкнутой обмоткой ротора, а диффузоры 2, укрепленные на подшипниковых щитах 3, направляют поток воздуха.

В табл. 3.1 и 3.2 дана увязка мощностей двигателей с высотами оси вращения (степень защиты соответственно 1Р44 и 1Р23). Шкала мощностей связана с установочными размерами. Номинальное напряжение двигателей 220, 380 и 660 В. Серия размещена на 17 высотах оси вращения.

В двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполняется вспойной из круглого провода или стержневой из меди прямоугольного сечения. Общий вид двигателя с фазным ротором представлен на рис. 3.5.

Отличительной особенностью машин с фазным ротором является наличие на роторе обмотки из проводников круглого или прямоугольного сечения, начала которой выведены на контактные кольца. Узел контактных колец вынесен из станины, а контактные кольца закрыты кожухом (см. рис. 3.5).

Узел контактных колец — консольного типа. Контактные кольца, опрессованные пластмассой, насаживаются на вал двигателя, они выполняются чугунными или медными. Выводные концы обмотки ротора подходят к трем кольцам через внутреннее отверстие в вале ротора. Обмотка ротора соединяется в звезду.

Токосъемный аппарат состоит из щеток и щеткодержателей, укрепленных на изолированной части пальца, металлический конец которого ввинчен в прилив подшипникового щита.

Таблица 3.1

Высота оси вращения h , мм	Мощность двигателя, кВт, при числе полюсов					
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$	$2p = 10$	$2p = 12$
50	0,09	0,06	—	—	—	—
	0,12	0,09	—	—	—	—
56	0,18	0,12	—	—	—	—
	0,25	0,18	—	—	—	—
63	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	0,75	0,55	0,37	—	—	—
	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—
80	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—
	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—
90	—	—	—	0,55	—	—
	3,0	2,2	1,5	1,1	—	—
100	4,0	3,0	—	—	—	—
	5,5	4	2,2	1,5	—	—
112	—	—	3,0	2,2	—	—
	7,5	5,5	4,0	3,0	—	—
132	—	7,5	5,5	4,0	—	—
	11	11	7,5	5,5	—	—
160	15	15	11	7,5	—	—
	18,5	18,5	15	11	—	—
180	22	22	—	—	—	—
	30	30	18,5	15	—	—
200	37	37	22	18,5	—	—
	45	45	30	22	—	—
225	55	55	37	30	—	—
250	75	75	45	37	22	—
	90	90	55	45	30	—
280	110	110	75	55	37	—
	132	132	90	75	45	—
315	160	160	110	90	55	45
	200	200	132	110	75	55
355	250	250	160	132	90	75
	315	315	200	160	110	90

Таблица 3.2

Высота оси вращения h , мм	Мощность двигателя, кВт, при числе полюсов					
	$2p = 2$	$2p = 4$	$2p = 6$	$2p = 8$	$2p = 10$	$2p = 12$
160	22	18,5	—	—	—	—
	30	22	—	—	—	—
180	37	30	18,5	15	—	—
	45	37	22	18,5	—	—
200	55	45	30	22	—	—
	75	55	37	30	—	—
225	90	75	45	37	—	—
	110	90	55	45	—	—
250	132	110	75	55	—	—
	160	132	90	75	45	—
280	200	160	110	90	55	—
	—	200	132	110	75	55
315	250	250	160	132	90	75
	315	315	200	160	110	90
355	400	400	250	200	132	110

Система вентиляции и степень защиты двигателей с фазным ротором — 1Р23 и 1Р44. В табл. 3.3 приведены высоты осей вращения и связь их с частотой вращения и мощностью.

При изготовлении серий электрических машин предусматривается максимальная унификация, поэтому большинство деталей одинаковые для машин как с короткозамкнутым, так и с фазным ротором.

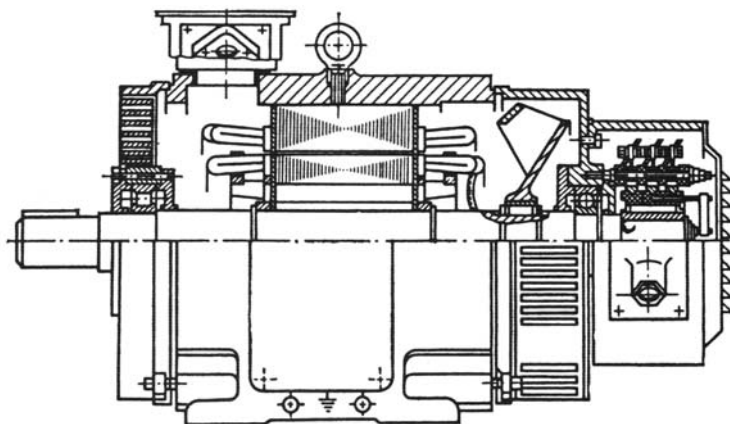


Рис. 3.5. Двигатель с фазным ротором 4АНК200 (степень защиты 1Р23)

Таблица 3.3

Высота оси вращения h , мм	Мощность двигателя, кВт, при частоте вращения, об/мин							
	1500	1000	750	1500	1000	750	600	500
	Степень защиты 1Р44			Степень защиты 1Р23				
160	10	7,5	5,5	15	—	—	—	—
	13	10	7,7	18,5	—	—	—	—
180	—	—	10	22	15	11	—	—
	18,5	13	32	30	18,5	15	—	—
200	22	18,5	15	37	22	18,5	—	—
	30	22	—	45	30	22	—	—
225	37	30	22	55	37	30	—	—
250	45	—	—	75	45	37	—	—
	55	37	30	90	55	45	—	—
	75	45	37	110	75	55	—	—
280	—	—	—	132	90	75	—	—
	—	—	—	160	110	90	—	—
315	—	—	—	200	132	110	75	55
	—	—	—	250	160	132	90	75
355	—	—	—	315	200	160	110	90
	—	—	—	400	250	200	132	110

Статор асинхронной машины с короткозамкнутым или с фазным ротором состоит из магнитопровода с обмоткой и станины. Магнитопровод статора набирается из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга и имеющих на внутренней поверхности пазы (см. рис. 3.3—3.5).

Сердечник статора состоит из отдельных пакетов, которые после сборки скрепляют скобами и укрепляют в станине. При сборке пакетов магнитопровода статора может быть выполнен скос пазов. Форма пазов и число пазов на статоре зависят от мощности и частоты вращения.

В производстве асинхронных двигателей используются горячекатаные и холоднокатаные стали толщиной 0,35 и 0,5 мм. Горячекатаные стали не имеют магнитной анизотропии, а холоднокатаные имеют значительную анизотропию. Горячекатаная сталь марки 1211 при напряженности магнитного поля $H = 2500$ А/м имеет индукцию 1,53 Тл, а удельные потери $p_{1,0/50} = 3,3$ Вт/кг.

Для асинхронных двигателей серии 4А с высотой оси вращения до 160 мм применяется холоднокатаная рулонная сталь марки 2013 с $B_{2500} = 1,65$ Тл и $p_{1,0/50} = 2,5$ Вт/кг. Для двигателей с высотой оси вращения свыше 160 мм используется холоднокатаная рулонная сталь марки 2212 с $B_{2500} = 1,6$ Тл и $p_{1,0/50} = 2,2$ Вт/кг.

Обычно из одного рулона штампуются листы как статора, так и ротора. Так как частота перемагничивания ротора небольшая и равна 1–2 Гц, листы ротора не изолируются друг от друга.

Станины двигателей изготавливаются из алюминиевого сплава АЛ-2, для двигателей большой мощности — из чугуна. Станины выполняются с прилитыми лапами, с продольными приливами для крепления подшипниковых щитов. Станины имеют поперечные ребра для улучшения охлаждения и усиления механической прочности.

Подшипниковые щиты выполняются из сплава АЛ-2. Отверстие под подшипник армировано стальной втулкой. Щиты двигателей большой мощности выполняются из чугуна. Для упрочнения конструкции щиты имеют ребра. В двигателях серии 4А одна подшипниковая опора со стороны вала плавающая, а вторая — фиксирующая. Подшипник, устанавливаемый в фиксирующей опоре, воспринимает радиальную и осевую нагрузки. Подшипник в плавающей опоре свободно перемещается в аксиальном направлении, предотвращая заклинивание при отклонении от предельных размеров и тепловых расширениях. Подшипниковый узел состоит из подшипников, подшипниковых крышек и элементов уплотнения. Подшипниковые узлы выполняются с устройством для пополнения смазки, а также с подшипниками, имеющими двустороннее уплотнение и постоянно заложённую смазку, рассчитанную на весь срок службы.

Валы двигателей единой серии 4А унифицированы. Длину и диаметр выступающего конца вала выбирают в зависимости от высоты оси вращения.

При конструировании асинхронных двигателей единых серий обеспечивается максимальная унификация узлов и отдельных деталей.

Кроме асинхронных двигателей единой серии 4А промышленностью выпускаются двигатели серий А2 и АО2. Асинхронные машины серий А2 и АО2 имеют больший расход материалов и другие установочные размеры. Конструктивное выполнение таких машин показано на рис. 3.6.

В последние годы Ярославский электромашиностроительный завод освоил новую серию РА — Российская асинхронная, а Владимирский электромоторный завод выпускает серию 5А, которая заменяет серию 4А.

Электротехнической промышленностью выпускаются высоковольтные асинхронные двигатели серий А, АК 12—

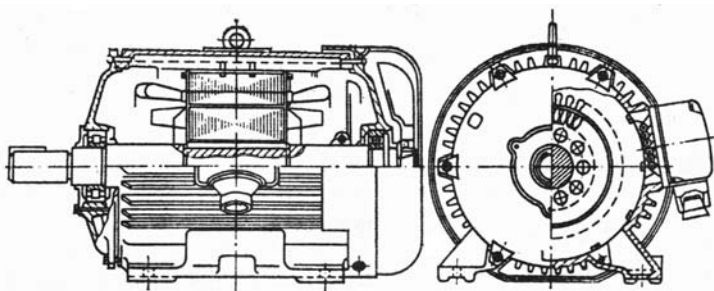


Рис. 3.6. Обдуваемый асинхронный двигатель АО 9-го габарита

13-го габаритов и их модификации на мощность свыше 100 кВт на напряжение 6000 В. Такие двигатели выпускаются с короткозамкнутым и фазным ротором. В двигателях с короткозамкнутым ротором применяется сварная клетка. Обмотки статора имеют изоляцию типа «монолит-2». Изоляция соответствует классу нагревостойкости F.

Для насосов и аэродинамических труб выпускаются асинхронные двигатели мощностью до 20 МВт. Одной из распространенных серий мощных асинхронных двигателей является серия АТД. Двигатели АТД выполняются с короткозамкнутым массивным ротором и водяным охлаждением обмотки статора.

Конструкции асинхронных микродвигателей отличаются от конструкций двигателей общего назначения. Это связано с особыми требованиями работы в системах автоматического управления, применением в бытовых приборах с однофазным питанием и функциональным использованием (тахогенераторы, датчики и другие устройства).

Конструкции наиболее распространенных асинхронных микродвигателей рассматриваются далее и в специальных курсах [2, 10, 12, 17].

Несмотря на то что конструкция асинхронного двигателя отработывалась десятилетиями многими конструкторскими коллективами, продолжают работы по ее совершенствованию и видоизменению. Проблема экономии материалов заставила искать пути создания безотходной технологии и замены традиционных материалов, применяемых в электромашиностроении.

При штамповке листов статора и ротора большая часть стали идет в отходы. В некоторых вырубках отходы превышают 50%. Примером безотходной конструкции магнито-

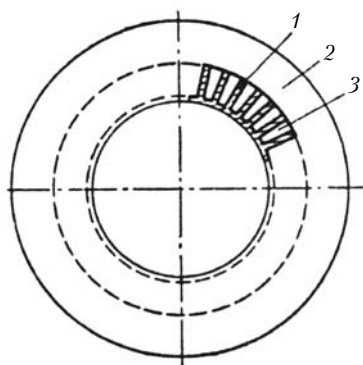


Рис. 3.7. Составной статор с гофрированной пазовой частью

провода статора является конструкция, показанная на рис. 3.7. Составной статор состоит из зубцовой части 1 и ярма магнитопровода 2, вставляемых друг в друга. Пазовая часть магнитопровода представляет собой гофрированную из полосы электротехнической стали гармошку, промежутки которой являются пазами 3, в которые укладывается обмотка. Ярмо наматывается из рулонной стали на ребро. Такая конструкция может

применяться в двигателях небольшой мощности.

Ведутся исследовательские работы по применению порошковой металлургии для изготовления магнитопроводов, применению стальных проводов вместо медных и алюминиевых, биметаллических проводов, состоящих из электропроводящей части и стальной, по которой замыкается магнитный поток. Конструкции асинхронных машин являются классическими и в то же время они развиваются и при появлении новых асинхронных машин непрерывно видоизменяются.

3.4. Обмотки асинхронных машин

Вращающееся поле в асинхронных машинах, как правило, создается обмоткой статора, которая подключается к сети. Большинство асинхронных машин имеет трехфазные симметричные обмотки, принцип построения которых рассмотрен в параграфах 1.9, 1.10.

Обмотки статора и фазные обмотки ротора асинхронных машин выполняются одно- и двухслойными (см. рис. 1.47—1.53). В зависимости от мощности и напряжения применяются петлевые (см. рис. 1.61) и волновые (см. рис. 1.62) обмотки.

Статорные обмотки асинхронных двигателей серии 4А выполняются только петлевыми. Применяются всыпные обмотки с мягкими катушками и обмотки с жесткими катушками.

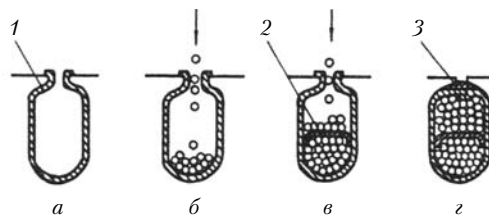


Рис. 3.8. Процесс укладки мягких секций в пазы

Всыпные обмотки применяются в низковольтных машинах до 100 кВт. Мягкие катушки перед укладкой в пазы наматываются на шаблоне из круглого медного или алюминиевого провода. После опрессовки и получения определенной формы секции укладываются в пазы, в которые помещается пазовая изоляция 1 (рис. 3.8, а). Затем вводятся в паз проводники обмотки и укладывается изоляционная прокладка между верхним и нижним слоями обмотки 2 (рис. 3.8, б, в). После заполнения пазы обмотка в пазу закрепляется клином 3 (рис. 3.8, г).

После укладки катушек в пазы производятся формовка лобовых частей и их бандажирование. Далее статор вместе с обмоткой подвергается пропитке.

Жесткие катушки изготавливаются из прямоугольного изолированного провода (см. рис. 1.50 и 1.51). Корпусная и межфазовая изоляции частично выполняются вместе с катушками, которые компаундируются или пропитываются до укладки в пазы. Затем катушки помещаются в полуоткрытые или открытые пазы, которые имеют пазовую изоляцию. Уложенные в пазы катушки соединяют между собой и окончательно пропитывают.

Обмотки с жесткими секциями обеспечивают больший коэффициент заполнения пазы, они более надежны. При применении жестких обмоток пазы прямоугольные, а зубцы имеют трапециевидальную форму. Обмотки с жесткими секциями применяются в машинах мощностью свыше 100 кВт.

Механизация обмоточных работ — один из основных путей снижения трудоемкости изготовления электрических машин. В последние годы на электромашиностроительных заводах широко применяются статорообмоточные станки. В большинстве статорообмоточных станков применяется концентрическая обмотка с одновременной укладкой обеих сторон секций в пазы. Применение всыпных обмоток обеспечивает полную механизацию изготовления обмоток. По-

этому обмотки с мягкими секциями применяются при изготовлении асинхронных машин наиболее массового выпуска. Такими машинами являются двигатели серии 5А мощностью до 100 кВт [11].

Обмотки с мягкими секциями имеют меньший вылет лобовых частей, трапецидальные пазы обеспечивают лучшее использование зубцовой зоны за счет зубцов равномерного сечения. К недостаткам обмоток с мягкими секциями следует отнести их меньшую надежность по сравнению с обмотками с жесткими секциями.

При изготовлении асинхронных двигателей единой серии 4А однослойные концентрические обмотки применяются в двигателях мощностью до 15 кВт.

Двухслойные обмотки с жесткими секциями применяются в двигателях мощностью свыше 100 кВт.

В диапазоне 15—100 кВт применяются одно-двухслойные обмотки, которые сочетают преимущества одно- и двухслойных обмоток. Эти обмотки допускают укорочение шага и укладываются в пазы статорообмоточными станками.

Одно-двухслойная обмотка состоит из концентрических катушек. Катушечная группа состоит из одной большой катушки и $q - 1$ малых катушек (q — число пазов на полюс и фазу). Большая катушка занимает весь паз, малые катушки — половину паза (рис. 3.9).

В двухслойных обмотках с укорочением шага (см. рис. 1.63, 1.64) в части пазов находятся секции, принадлежащие разным фазам. В одно-двухслойной обмотке в пазах,

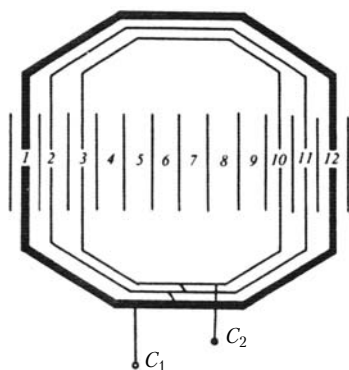


Рис. 3.9. Катушки
одно-двухслойной обмотки:
1—12 — номера пазов

принадлежащих одной фазе, располагается большая катушка с двойным числом витков, а в остальных пазах в два слоя помещаются стороны катушек разных фаз. Число катушечных групп равно числу полюсов. Одно-двухслойная обмотка выполняется при $q > 2$. При $q = 2$ обмотка вырождается в концентрическую однослойную обмотку.

Рассматриваемые до сих пор обмотки имели целое число пазов на полюс и фа-

зу q . Иногда целесообразно применять обмотки с дробным q . Например, в машинах с небольшим внутренним диаметром статора при трехфазной обмотке с $q = 1$ и $p = 2$, $z = 2mpq = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 12$, а если принять $q = 0,5$, то $z = 6$. Ширина зубца по технологическим соображениям ограничивается 1,8–2 мм, поэтому при малом диаметре легче выполнить машину с дробным q . При $q = 0,5$ обмотки охватывают каждый зубец. Обмотки с $q < 1$ применяются в многополюсных тихоходных асинхронных микродвигателях. При $q > 1$ обмотки состоят из катушечных групп с разным числом катушек. Обмотки фаз получаются несимметричными на полюсном делении, но симметричными по всему внутреннему диаметру статора.

На рис. 3.10 дана схема однослойной трехфазной обмотки с $q = 1\frac{1}{2}$, $2p = 4$.

В двухслойных обмотках дробное q применять легче. Однако следует иметь в виду, что применения обмоток статора с дробным q в асинхронных машинах следует избегать из-за худшей кривой МДС в зазоре. Обмотки с дробным q применяют при перемотке статоров на другое число полюсов, когда изготовление штампов нецелесообразно.

Во многих электроприводах требуется ступенчатое регулирование частоты вращения. Это можно осуществить путем переключения числа пар полюсов машины. В простейшем варианте для этого надо в пазы статора положить две обмотки на разное число полюсов. При этом ротор с короткозамкнутой обмоткой обеспечит работу асинхронного двигателя с высокими энергетическими показателями при раз-

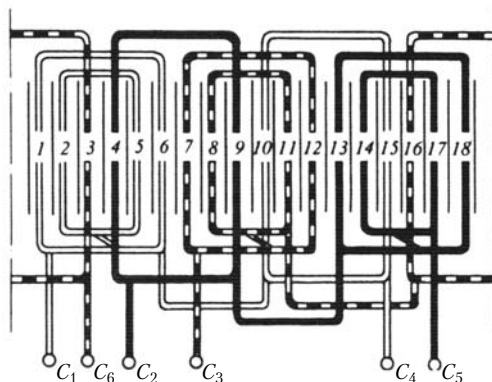


Рис. 3.10. Схема однослойной обмотки с дробным q ($m = 3$, $2p = 4$, $q = 1\frac{1}{2}$, $z = 18$)

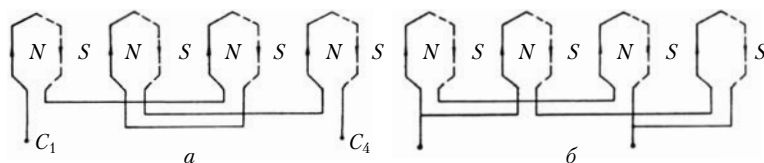


Рис. 3.11. Соединение катушечных групп при $2p = 8$:

a — последовательное; b — параллельное

ных синхронных частотах вращения. Однако с двумя обмотками статора использование активных материалов плохое, так как одна из обмоток не будет использоваться.

Переключение числа полюсов в отношении 1:2 можно получить, используя одну обмотку. В трехфазных петлевых двухслойных обмотках переключение числа полюсов проще всего осуществляется путем изменения направления тока в отдельных частях обмотки.

При переключении трехфазной обмотки с числа полюсов $2p = 8$ на $2p = 4$ надо иметь 12 катушечных групп, комбинируя которые, можно получить две синхронные частоты вращения при параллельном и последовательном соединениях катушек.

На рис. 3.11, a , b и 3.12, a , b показано соединение катушечных групп одной фазы обмотки при последовательном и параллельном соединениях для $2p = 8$ и $2p = 4$.

Чтобы осуществить необходимые переключения катушечных групп, в каждой фазе надо иметь по четыре вывода. В трехфазной машине должно быть 12 выводов. Чтобы двигатель вращался в одном и том же направлении при переключении числа пар полюсов, нужно еще изменить и чередование фаз, т.е. поменять местами любые две фазы.

Рассмотренная схема переключения не является единственной. К многоскоростным двигателям мы еще вернемся в конце этой главы, там же будут рассмотрены некоторые схемы обмоток несимметричных асинхронных двигателей.

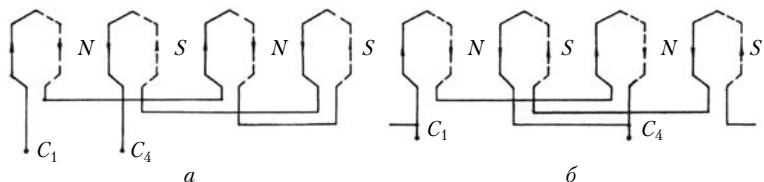


Рис. 3.12. Соединение катушечных групп при $2p = 4$:

a — последовательное; b — параллельное

Обмотки роторов асинхронных машин можно разделить на две группы: короткозамкнутые и фазные.

Короткозамкнутая обмотка с простой беличьей клеткой (рис. 3.13, *а*) состоит из ряда медных или чугунных стержней круглого сечения, уложенных в пазы. Стержни с обеих сторон магнитопровода ротора приваривают к медным кольцам. При выполнении короткозамкнутого ротора пазы не изолируют. Длина стержней обмотки принимается несколько большей длины стали ротора.

Для улучшения пусковых характеристик двигателя применяют ротор с глубокими пазами, когда беличья клетка выполняется из стержней прямоугольного сечения (рис. 3.13, *б*). В единых сериях короткозамкнутые обмотки роторов изготавливаются путем заливки пазов алюминием. При заливке вместе со стержнями отливаются и короткозамыкающие кольца. Форма пазов при заливке может быть весьма разнообразной. Наибольшее распространение получили пазы бутылочной формы (рис. 3.13, *в*).

Для улучшения пусковых характеристик находят применение также короткозамкнутые обмотки с двойной беличьей клеткой (рис. 3.13, *г*).

Частота вращения асинхронных двигателей может достигать 500 тыс. об/мин. При высоких частотах вращения шихтованный ротор из-за низкой механической прочности не применяют. В таких двигателях ротор выполняют массивным. При этом ротор представляет собой ферромагнитный цилиндр. В массивном роторе совмещают магнитопровод и обмотку. Широкого применения массивный ротор не находит из-за худших по сравнению с шихтованным ротором энергетических характеристик и большей трудоемкости изготовления.

В двигателях с фазным ротором на роторе применяются всыпные или катушечные обмотки и стержневые.

Всыпные обмотки — петлевые трехфазные двухслойные обмотки с укороченным шагом — укладывают в пазы трапецидально-овальной формы (рис. 3.13, *д*, *е*). Обмотки изготавливают из круглого медного провода. Технология укладки,

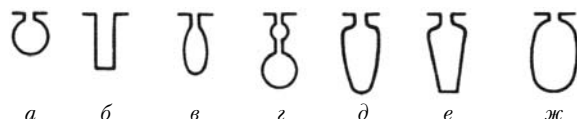


Рис. 3.13. Наиболее распространенные формы пазов асинхронных двигателей

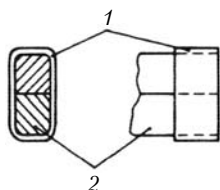


Рис. 3.14. Соединение стержней двухслойной волновой обмотки ротора

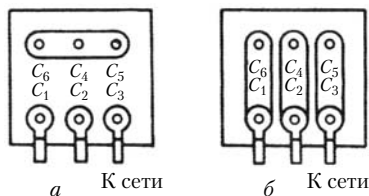


Рис. 3.15. Соединение обмоток в звезду (а) и треугольник (б) на коробке выводов

изоляция, пропиточные лаки те же, что и для статорных обмоток. Всыпные обмотки дают возможность иметь на кольцах напряжения, близкие к напряжению обмотки статора, что облегчает конструкцию щеточного аппарата и пускорегулирующей аппаратуры, так как снижаются токи. Эти обмотки технологичны и допускают уменьшение числа пазов ротора. Всыпные обмотки применяются в асинхронных двигателях мощностью до 50 кВт.

Стержневые обмотки — двухслойные волновые обмотки, состоящие из стержней прямоугольной меди, уложенных в полузакрытые пазы ротора (рис. 3.13, ж). Стержни обмотки в пазы вставляют с торца, а затем отгибают одну лобовую часть. Стержни обмотки 2 соединяются между собой при помощи хомутиков 1 (рис. 3.14). Хомутики одновременно выполняют роль лопастей вентилятора, обеспечивая при вращении ротора перемешивание воздуха внутри машины.

Шаги обмотки определяются стержнями, соединяемыми со стороны контактных колец и с противоположной стороны ротора. Сумма этих шагов равняется полюсному делению. Чтобы не замкнуть обмотку после обхода пазов ротора, последний шаг в каждом обходе делают укороченным.

Стержневые обмотки фазных роторов применяются в двигателях средней и большой мощностей при напряжении на контактных кольцах до 500 В. Недостатки стержневых обмоток — наличие большого числа паек и большая трудоемкость.

Низковольтные асинхронные двигатели единой серии изготавливаются на напряжения 220, 380 и 660 В. На доске выводы обмоток располагают таким образом, что их можно соединять в звезду и треугольник (рис. 3.15, а, б). При большем напряжении обмотки соединяют в звезду, а при меньшем — в треугольник. Обмотки высоковольтных асинхронных машин соединяются в звезду.

3.5. Векторная диаграмма асинхронной машины

У асинхронных машин число витков на роторе и статоре различное. Процессы преобразования энергии принципиально не изменятся, если рассматривать машину с одинаковыми числами витков на роторе и статоре. Обычно число витков обмотки ротора приводится к числу витков обмотки статора. При приведении сохраняются потребляемая из сети активная и реактивная мощности, КПД и $\cos \varphi$. В обозначения приведенных величин добавляют штрих.

Сохраняя неизменными МДС приведенной обмотки и реальной, как и для трансформаторов, получим приведенный ток вторичной обмотки

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{m_2 w_2 k_{o2}}{m_1 w_1 k_{o1}}, \quad (3.16)$$

где m_1, m_2 — числа фаз обмоток статора и ротора; w_1, w_2 — числа витков фазы статора и ротора; k_{o1}, k_{o2} — обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора.

Из условия неизменности потока в машине с приведенным числом витков обмотки и с действительным числом витков

$$\Phi_m = \frac{E_2}{4,44 w_2 k_{o2} f_1} = \frac{E'_2}{4,44 w_1 k_{o1} f_1} \quad (3.17)$$

получим

$$\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 \frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}}. \quad (3.18)$$

Из условия сохранения потерь в роторе

$$m_2 I_2^2 r_2 = m_1 (I'_2)^2 r'_2 \quad (3.19)$$

найдем

$$r'_2 = \frac{I_2^2}{(I'_2)^2} \frac{m_2}{m_1} r_2 = \left(\frac{m_1 w_1 k_{o1}}{m_2 w_2 k_{o2}} \right)^2 \frac{m_2}{m_1} r_2 = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}} \right)^2 r_2. \quad (3.20)$$

Из условия неизменности реактивной мощности имеем

$$x'_2 = x_2 \frac{r'_2}{r_2} = x_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}} \right)^2. \quad (3.21)$$

Таким образом, коэффициент приведения для тока

$$k_I = \frac{m_2 w_2 k_{o2}}{m_1 w_1 k_{o1}}; \quad I'_2 = k_I I_2. \quad (3.22)$$

Коэффициент приведения ЭДС и напряжения

$$k_U = \frac{w_1 k_{o1}}{w_2 k_{o2}}; \quad U'_2 = k_U U_2. \quad (3.23)$$

Коэффициент приведения сопротивлений

$$k_z = \frac{k_U}{k_I} = \frac{m_1 (w_1 k_{o1})^2}{m_2 (w_2 k_{o2})^2}. \quad (3.24)$$

При этом

$$z'_2 = z_2 k_z. \quad (3.25)$$

При приведении короткозамкнутой обмотки ротора считают, что число стержней $z_2 = m_2$, а число витков $w_2 = 1/2$, что следует из определения числа зубцов (см. параграф 1.15), когда $p = 1$ и $q = 1$. Тогда для короткозамкнутого ротора

$$k_z = \frac{4m_1 (w_1 k_{o1})^2}{z_2}. \quad (3.26)$$

Уравнения приведенной асинхронной машины согласно (3.14) выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1, \\ 0 = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' \frac{r_2'}{s}, \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'. \end{cases} \quad (3.27)$$

Геометрическим образом уравнений (3.27) на комплексной плоскости является векторная диаграмма асинхронной машины (рис. 3.16).

Векторная диаграмма асинхронной машины отличается от векторной диаграммы трансформатора тем, что $\dot{U}'_2 = 0$, а ЭДС ротора \dot{E}_2' определяется падением напряжения на индуктивном сопротивлении ротора $j\dot{I}_2' x_2'$ и активном сопротивлении:

$$\dot{I}_2' \frac{r_2'}{s} = \dot{I}_2' r_2' + \dot{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s}, \quad (3.28)$$

где $\dot{I}_2' r_2'$ — падение напряжения на активном сопротивлении обмотки ротора; $\dot{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s}$ — напряжение, характеризующее механическую мощность на валу машины P'_2 .

Действительно, если умножить члены равенства (3.28) на I_2 и m_1 , то получим

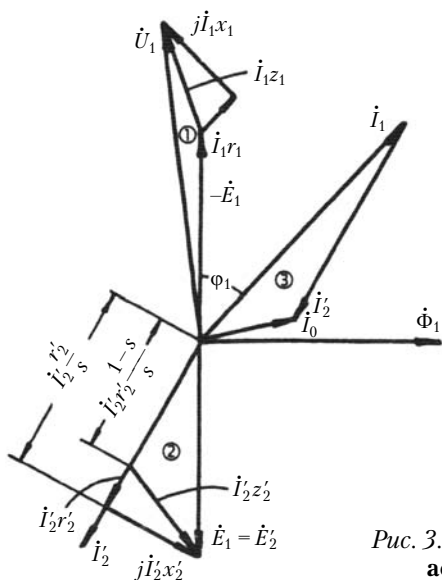


Рис. 3.16. Векторная диаграмма асинхронной машины

$$m_1(I_2')^2 r_2' + m_1(I_2')^2 r_2' \frac{1-s}{s},$$

где первый член определяет потери в роторе, а второй

$$m_1(I_2')^2 r_2' \frac{1-s}{s} = m_2 I_2'^2 r_2 \frac{1-s}{s} = m_1 U_2' I_2' \quad (3.29)$$

определяет механическую мощность на валу машины P'_2 . Мощность P'_2 включает в себя полезную мощность на валу машины P_2 и механические потери $P_{\text{мех}}$.

Для разделения механических потерь и полезной мощности на валу машины можно ввести эквивалентные активные сопротивления, выделив их из $r_2' \frac{1-s}{s}$. В асинхронных двигателях единых серий скольжение изменяется в небольших пределах ($s_{\text{ном}} = 1 \div 4\%$), поэтому механические потери можно считать постоянными.

Векторная диаграмма на рис. 3.16 построена для одной фазы машины. Поэтому для определения P'_2 в выражении (3.29) необходимо произведения токов и напряжений умножить на число фаз статора или ротора.

На векторной диаграмме уравнениям статора соответствуют треугольник 1, уравнениям ротора — треугольник 2 и уравнения токов — треугольник 3.

В асинхронных машинах, как и в трансформаторах, намагничивающий ток $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$. При этом результирующая МДС из векторной диаграммы

$$\dot{F}_0 = \frac{m_1 \sqrt{2} \omega_1 k_{o1}}{\pi p} \dot{I}_1 - \frac{m_1 \sqrt{2} \omega_2 k_{o2}}{\pi p} \dot{I}_2'. \quad (3.30)$$

Результирующая МДС и МДС обмоток ротора и статора — пространственные векторы, так как МДС обмоток создаются благодаря определенному пространственному сдвигу обмоток и временному сдвигу токов. При построении векторной диаграммы можно использовать намагничивающий фазный ток \dot{I}_0 или результирующую МДС обмотки.

При построении векторной диаграммы совмещаются временные $\dot{U}, \dot{I}, \dot{E}$ и пространственные $\dot{\Phi}_m, \dot{F}$ векторы. При анализе рабочих процессов в асинхронных машинах целесообразно пользоваться результирующими векторами $\tilde{U}, \tilde{I}, \tilde{F}, \tilde{\Psi}$ и $\tilde{\Phi}_m$, сочетающими временные и пространственные представления.

Построение диаграммы начинается с того, что в масштабе откладывают вектор потока $\dot{\Phi}_m$. Намагничивающий ток \dot{I}_0 не совпадает с $\dot{\Phi}_m$, так как намагничивающий ток имеет активную и реактивную составляющие:

$$\dot{I}_0 = I_{0a} + jI_{0p}. \quad (3.31)$$

После определения тока \dot{I}_0 по магнитному потоку $\dot{\Phi}_m$ рассчитывают ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ и определяют ток \dot{I}_2' . По формулам (3.22) ток ротора приводят к обмотке статора и по (3.27) находят ток статора \dot{I}_1 . Затем по известным ЭДС, токам и сопротивлениям по уравнениям (3.27) строят векторную диаграмму.

Векторные диаграммы можно построить для нескольких значений токов нагрузки и по ним можно судить об изменении токов, потерь, $\cos \varphi$ и падений напряжений при изменении нагрузки на валу машины.

При холостом ходе асинхронного двигателя $P_2 = 0$ и ток холостого хода $\dot{I}_0 = \dot{I}_1$, так как можно считать, что $\dot{I}_2' \approx 0$. Ток в роторе равен нулю, если механические потери равны нулю. При холостом ходе активная мощность, потребляемая из сети, небольшая и ток \dot{I}_1 имеет в основном реактивную составляющую. При этом реактивная мощность, необходимая для создания магнитного поля, поступает из сети и ток \dot{I}_1 отстает от \dot{U}_1 почти на 90° . Коэффициент мощности $\cos \varphi$ характеризует соотношение между активной и реактивной мощностями.

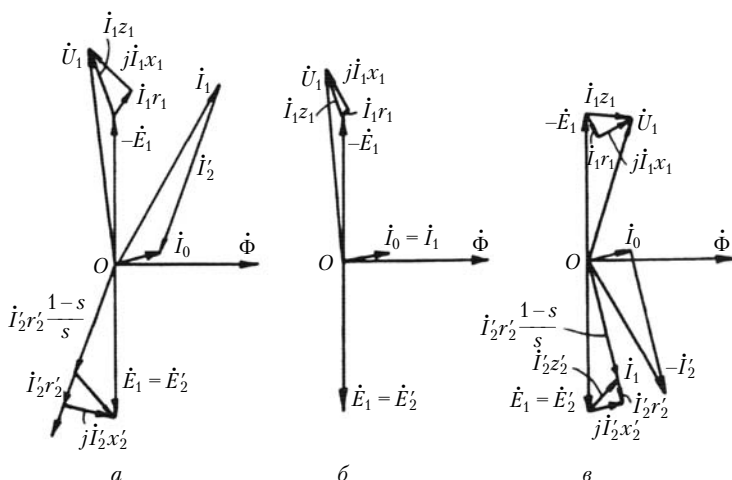


Рис. 3.17. Векторная диаграмма асинхронной машины в режиме двигателя (а), холостого хода (б) и генератора (в)

С ростом нагрузки растет ток в роторе \dot{I}_2' , увеличивается и ток в статоре \dot{I}_1 . Из-за падения напряжения на обмотке статора несколько уменьшается \dot{E}_1 , что приводит к небольшому уменьшению потока $\dot{\Phi}_m$ и снижению \dot{I}_0 . Однако в первом приближении можно принять, что \dot{I}_0 при изменении нагрузки не изменяется. Это облегчает построение векторных диаграмм. С увеличением нагрузки на валу увеличивается скольжение, растут электрические потери в роторе и статоре, растет потребляемая из сети активная мощность P_1 , а реактивная мощность остается практически неизменной.

На рис. 3.17, а — в представлены векторные диаграммы асинхронной машины в двигательном режиме, при холостом ходе и в генераторном режиме.

Векторные диаграммы асинхронных машин при проектировании практически не используются, но они имеют важное методическое значение при изучении асинхронных машин.

3.6. Схема замещения асинхронной машины

Уравнениям (3.27) соответствует Т-образная схема замещения, состоящая из активных и индуктивных сопротивлений (рис. 3.18). Нетрудно убедиться, что уравнения статора асинхронной машины получаются при обходе первого контура, а ротора — второго контура в схеме замещения.

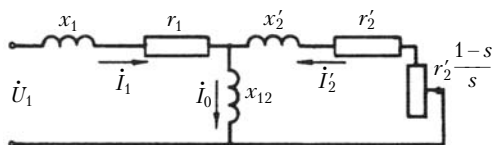


Рис. 3.18. Схема замещения асинхронной машины, соответствующая уравнениям (3.27)

Ток \dot{I}'_2 уравнивается током \dot{I}_1 , а их сумма определяет намагничивающий ток \dot{I}_0 . Как уравнения (3.27), векторная диаграмма (см. рис. 3.16), так и схема замещения записываются и строятся для одной фазы машины.

Падение напряжения на сопротивлении взаимной индукции x_{12} определяет ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. Сопротивление обмотки статора

$$z_1 = r_1 + jx_1, \quad (3.32)$$

а сопротивление обмотки ротора

$$z'_2 = r'_2 + jx'_2. \quad (3.33)$$

Потери в сопротивлении $r'_2 \frac{1-s}{s}$ эквивалентны механической мощности на валу машины P_2 .

В уравнениях (3.27) не учитываются потери в стали. Их можно приближенно учесть, представив асинхронную машину как двухобмоточную — без учета контуров вихревых токов (см. параграф 3.12) — и введя в намагничивающий контур активное сопротивление r_{12} , учитывающее потери в стали.

Если потери в стали машины известны, то активное сопротивление

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст}}}{m_1 I_{0a}^2}, \quad (3.34)$$

где I_{0a} — активная составляющая тока холостого хода.

Определив активное сопротивление, эквивалентное потерям в стали, можно ввести в рассмотрение процессов преобразования энергии в асинхронных машинах главное сопротивление или сопротивление взаимной индукции

$$z_{12} = r_{12} + jx_{12}. \quad (3.35)$$

Тогда схема замещения асинхронной машины с учетом потерь в стали будет выглядеть так, как показано на рис. 3.19.

При изменении нагрузки в асинхронной машине изменяется скольжение s . При неподвижном роторе $s = 1$ и $f_2 = f_1$.

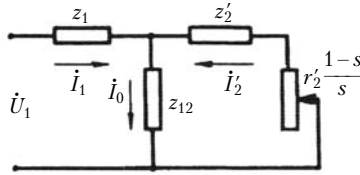


Рис. 3.19. Т-образная схема замещения асинхронной машины

При изменении скольжения $f_2 = f_1 s$. При неизменном потоке Φ_m , который определяется приложенным напряжением сети \dot{U}_1 и падением напряжения на z_1 , ЭДС машины

$$E_1 = E'_2 = 4,44 f_1 w_1 k_{o2} \Phi_m, \quad (3.36)$$

при изменении скольжения

$$E_{2s} = 4,44 f_1 s w_2 k_{o2} \Phi_m. \quad (3.37)$$

При изменении частоты в роторе будет изменяться индуктивное сопротивление обмотки ротора:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi f_1 s L_{\sigma 2} = s x_2,$$

где $L_{\sigma 2}$ — индуктивность рассеяния обмотки ротора при $s = 1$ ($f_2 = f_1$); x_2 — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, $x_2 = 2\pi f_1 L_{\sigma 2}$; x_{2s} — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора при любом скольжении s .

Активное сопротивление обмотки ротора зависит от частоты тока ротора, так как проявляется поверхностный эффект. Однако этим изменением сопротивления можно пренебречь.

Ток в роторе машины

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_{2s}}{z'_{2s}} = \frac{s \dot{E}'_{2s}}{r'_2 + j s x'_2}, \quad (3.38)$$

где

$$z'_{2s} = r'_2 + j s x'_2. \quad (3.39)$$

Из выражения (3.38), разделив числитель и знаменатель на s , получим

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_{2s}}{\frac{r'_2}{s} + j x'_2}. \quad (3.40)$$

При приведении вращающейся машины к неподвижной ток в роторе \dot{I}'_2 остается неизменным. Таким образом, реальная асинхронная машина приводится к неподвижной за счет

изменения активного сопротивления ротора до $\frac{r'_2}{s}$. Токи, активные мощности и потери во вращающейся машине и неподвижной остаются неизменными.

Схема замещения асинхронной машины (см. рис. 3.19) и схема трансформатора (см. рис. 2.5) различаются лишь тем, что в трансформаторе ко вторичной обмотке приложено напряжение U'_2 , а в схеме замещения асинхронной машины включено сопротивление $r'_2 \frac{1-s}{s}$, потери в котором эквиваленты механической мощности на валу машины.

Учитывая, что схемы замещения трансформатора и асинхронной машины мало отличаются друг от друга, можно рассматривать работу асинхронной машины как работу неподвижной, работающей как трансформатор. Однако сведение более сложных процессов преобразования энергии в асинхронной машине к таким же процессам в трансформаторе не всегда правомерно. Поэтому более правильно рассматривать теорию электрических машин, идя от обобщенной машины к асинхронной машине, а затем — к трансформатору.

В одних учебниках рассмотрение отдельных типов электрических машин начинается с трансформаторов, а в других — с машин постоянного тока. Начинать с машин постоянного тока удобно, так как часто параллельно с курсом электрических машин идет курс автоматизированного электропривода, в котором анализ электроприводов начинается с приводов постоянного тока. Исторически машины постоянного тока появились раньше машин переменного тока, что оказало определенное влияние на развитие теории и создание учебников. Трансформаторы — более простые электротехнические устройства, поэтому методически более правильно начинать изучение с электромагнитных преобразователей. Освоив главу «Введение в электромеханику», можно изучение электрических машин начинать с любого типа машин.

Параметры схемы замещения в относительных единицах для асинхронных машин единых серий мощностью от нескольких киловатт до сотен киловатт изменяются в следующих пределах: $x_{12*} = 2 \div 4$; $r_{12*} = 0,08 \div 0,35$; $r_{1*} \approx r_{2*} = 0,01 \div 0,07$; $x_{1*} \approx x_{2*} = 0,08 \div 0,13$.

С увеличением мощности машин относительные значения активных сопротивлений уменьшаются, а индуктивных

сопротивлений возрастают. Индуктивное сопротивление x_{12}^* зависит от $\cos \varphi$ машины. Чем ниже $\cos \varphi$, т.е. чем больше реактивная мощность, потребляемая из сети, тем меньше x_{12}^* . Чем больше число полюсов в машине, тем меньше x_{12}^* .

Сопротивление взаимной индукции x_{12}^* в основном определяется воздушным зазором. Чем меньше воздушный зазор, тем больше x_{12}^* . Существует оптимальное соотношение между параметрами схемы замещения, при котором асинхронная машина имеет лучшие энергетические и массогабаритные показатели. Оптимальное значение x_{12}^* в двигателях единых серий находится вблизи минимально возможного воздушного зазора между ротором и статором, допустимого из механических соображений.

Обращаясь к Т-образной схеме замещения асинхронной машины (см. рис. 3.19), следует отметить, что с ростом нагрузки на валу машины растут токи \dot{I}_2' и \dot{I}_1 . При этом за счет падения напряжения на сопротивлении z_1 уменьшается ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$, что приводит к уменьшению потока Φ_m и намагничивающего тока \dot{I}_0 . Это изменение тока можно не учитывать при анализе рабочих процессов в машине при изменении скольжения в небольших пределах для номинальных режимов.

Более удобной схемой замещения асинхронной машины является Г-образная схема замещения, в которой намагничивающий контур вынесен на вывод сети (рис. 3.20). В этой схеме замещения ток холостого хода не зависит от нагрузки и совпадает с действительным током \dot{I}_0 в Т-образной схеме замещения при идеальном холостом ходе, когда $s = 0$.

При холостом ходе в асинхронном двигателе s близко к нулю, но не равно ему, так как двигатель из сети потребляет активную мощность, идущую на покрытие механических потерь и потерь в стали. При идеальном холостом ходе электромагнитная мощность $P_{эм}$ равна нулю, но двигатель потребляет из сети активную мощность, которая идет на покрытие потерь в стали. В этом режиме асинхронный двигатель устойчиво работать не может и должен вращаться другой машиной.

Из Т-образной схемы замещения токи в статоре и роторе

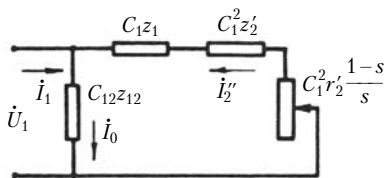


Рис. 3.20. Г-образная схема замещения асинхронной машины

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{z_{12} + z'_{23}}{z_1 z_{12} + z_{12} z'_{23} + z_1 z'_{23}} = \dot{U}_1 \frac{1 + \frac{z'_{23}}{z_{12}}}{z_1 + \dot{C}_1 z'_{23}}; \quad (3.41)$$

$$-\dot{I}'_2 = \dot{U}_1 \frac{z_{12}}{z_1 z_{12} + z_{12} z'_{23} + z_1 z'_{23}} = \dot{U}_1 \frac{1}{z_1 + \dot{C}_1 z'_{23}}, \quad (3.42)$$

где $z'_{23} = \frac{r'_2}{s + jx'_2}$; \dot{C}_1 — комплексный коэффициент:

$$\dot{C}_1 = \frac{z_1 + z_{12}}{z_{12}}. \quad (3.43)$$

В Г-образной схеме замещения

$$\dot{I}''_2 = \dot{I}_1 - \dot{I}_0 = \dot{U}_1 \frac{1 + \frac{z'_{23}}{z_{12}}}{z_1 + \dot{C}_1 z'_{23}} - \frac{\dot{U}_1}{z_1 + z_{12}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{C}_1(z_1 + \dot{C}_1 z'_{23})} = \frac{\dot{I}'_2}{\dot{C}_1}. \quad (3.44)$$

При этом сопротивление рабочего контура в Г-образной схеме замещения

$$\dot{C}_1(z_1 + \dot{C}_1 z'_{23}) = \dot{C}_1 z_1 + \dot{C}_1^2 z'_{23}. \quad (3.45)$$

Таким образом, в Г-образной схеме замещения асинхронной машины в контуре ротора протекает ток \dot{I}''_2 и сопротивление, определяемое по выражению (3.45), отличается от z'_{23} в Т-образной схеме замещения.

Г-образная схема замещения используется в теории асинхронных машин для построения круговой диаграммы.

Коэффициент \dot{C}_1 можно представить в следующем виде:

$$\dot{C}_1 = 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_{12} + jx_{12}} = 1 + \frac{r_1 r_{12} + x_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} - j \frac{r_1 x_{12} + x_1 r_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2}. \quad (3.46)$$

Обычно в асинхронных машинах $r_1 x_{12} > x_1 r_{12}$ и мнимая часть отрицательная. Поэтому в показательной форме

$$\dot{C}_1 = C_1 e^{-j\gamma}, \quad (3.47)$$

где

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_{12} - x_1 r_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2 + r_1 r_{12} + x_1 x_{12}} \approx \arctg \frac{r_1 x_{12} - x_1 r_{12}}{x_{12}(x_{12} + x_1)}. \quad (3.48)$$

В асинхронных машинах единых серий $\gamma < 1^\circ$, поэтому можно с достаточной точностью считать $\gamma = 0$, а \dot{C}_1 — вещественным числом. Модуль \dot{C}_1 :

$$\dot{C}_1 = \frac{r_1 r_{12} + x_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}. \quad (3.49)$$

В двигателях общего назначения C_1 мало отличается от единицы: $C_1 \approx 1,02 \div 1,06$. Обращаясь к формуле (3.43), можно отметить, что C_1 есть отношение напряжения U_1

к ЭДС $-\dot{E}_1$ при идеальном холостом ходе: $\dot{C}_1 = \frac{\dot{U}_1}{-\dot{E}_1}$.

Принимая $C_1 = 1$, во многих практических расчетах можно пользоваться упрощенной Г-образной схемой замещения (рис. 3.21).

Соотношения параметров схем замещения двигателей единых серий таковы, что переход от Т-образной к упрощенной Г-образной схеме замещения не приводит к заметным погрешностям. Обычно погрешность в определении токов в статоре и роторе не превышает 3–5%. Чтобы уменьшить погрешность в определении тока \dot{I}_0 , в намагничивающий контур Г-образной схемы замещения вводят сопротивление z_1 .

Схемы замещения играют важную роль в теории асинхронных машин. На их базе получены основные соотношения для установившихся режимов, которые лежат в основе проектирования асинхронных машин. В последние годы схемы замещения все больше отступают на второй план, так как ЭВМ дают возможность решать основные уравнения асинхронных машин (3.3), (3.4), (3.7).

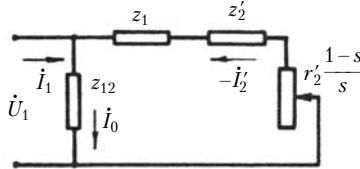


Рис. 3.21. Упрощенная Г-образная схема замещения асинхронной машины

3.7. Круговая диаграмма

При проектировании и эксплуатации асинхронных машин необходимо знать, как будут изменяться токи, потери, КПД и $\cos \phi$ при изменении нагрузки на валу машины. Круговая диаграмма наглядно и с достаточной точностью позволяет определить показатели машины при изменении s от $-\infty$ до $+\infty$.

При изменении скольжения конец вектора тока \dot{I}_1 описывает непрерывную замкнутую кривую, которая называется геометрическим местом тока. При U_1 и $f_1 = \text{const}$ и постоянных параметрах (неизменных активных и индуктивных

сопротивлениях) геометрическим местом концов векторов тока \dot{I}_1 является окружность. Эта окружность вместе с дополнительными прямыми называется *круговой диаграммой* асинхронной машины.

Круговая диаграмма имеет важное значение в теории асинхронных машин и до сих пор используется для построения рабочих характеристик. Она является примером применения теории электромеханики для решения практических задач.

Первой работой по теории круговой диаграммы является статья А. Гейланда, опубликованная в 1894 г. Теорией геометрических мест токов электрических машин занимались многие ученые-электромеханики. Наибольший вклад в развитие схем замещения и круговой диаграммы внесли Э. Арнольд, А. Беренд, А. Блондель, Р. Гольдшмидт, К. А. Круг, М. П. Костенко, Г. Осанна, Г. Н. Петров, К. И. Шенфер и др.

Из Г-образной схемы замещения рис. 3.21 можно получить схему замещения асинхронной машины рис. 3.22. В этой схеме замещения сопротивление короткого замыкания

$$z_k = z_1 + z'_2 = (r_1 + r'_2) + j(x_1 + x'_2) = r_k + jx_k, \quad (3.50)$$

где r_k , x_k — активное и индуктивное сопротивления асинхронной машины при коротком замыкании.

В схеме замещения рис. 3.22

$$r_{ks} = r_1 + \frac{r'_2}{s} = r_1 + r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s};$$

$$z_{ks} = r_{ks} + jx_k; \quad (3.51)$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{I}_2 r_{ks} - j\dot{I}_2 x_k. \quad (3.52)$$

Разделив выражение (3.52) на jx_k , получим

$$-j \frac{\dot{U}_1}{x_k} = j\dot{I}_2' \frac{r_{ks}}{x_k} - \dot{I}_2'. \quad (3.53)$$

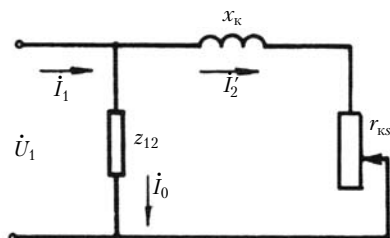


Рис. 3.22. Видоизменение схемы замещения асинхронной машины

Уравнение (3.53) есть сумма трех токов, которые образуют на комплексной плоскости \dot{U}_1 , $-j$ прямоугольный треугольник ABD (рис. 3.23). При изменении s от $+\infty$ до $-\infty$ сопротивление $r_{ks} = f(s)$ (3.51) изменяется, а x_k не зависит от скольжения.

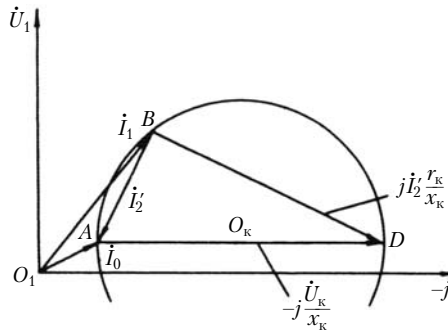
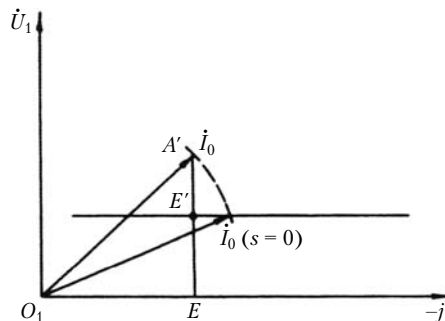


Рис. 3.23. К построению круговой диаграммы

При неизменном фазном напряжении сети \dot{U}_1 для схемы замещения (см. рис. 3.22) при изменении скольжения ток $-\dot{I}_2'$ обратно пропорционален комплексному сопротивлению z_{KS} . При изменении z_{KS} по прямой линии геометрическим местом концов вектора тока \dot{I}_2' является окружность, диаметр которой $AD = D_K$. Таким образом, уравнению (3.53) и Г-образной схеме замещения на комплексной плоскости $\dot{U}_1, -j$ соответствует круговая диаграмма.

Построение круговой диаграммы начинают с того, что выбирают масштаб напряжения m_U и тока m_I и проводят оси \dot{U}_1 и $-j$ (см. рис. 3.23). Далее из точки O_1 в масштабе откладывают вектор тока холостого хода \dot{I}_0 . Чтобы найти точку идеального холостого хода, где $s = 0$, необходимо провести следующие построения. Опустив из точки A' перпендикуляр на ось $-j$, делят отрезок $A'E$ примерно пополам и проводят через точку E' линию, параллельную оси $-j$ (рис. 3.24). Затем проводят радиусом O_1A' окружность и находят точку идеального холостого хода A . Эти построения оправданы, так

Рис. 3.24. К определению точки $s = 0$ круговой диаграммы

как при холостом ходе потери в асинхронной машине включают потери в стали и механические потери, которые примерно равны друг другу. При таком построении в крупных асинхронных машинах погрешность от некоторого увеличения реактивной составляющей тока холостого хода небольшая. Для микромашин приближенная круговая диаграмма и Г-образная схема замещения дают большие погрешности. Чтобы двигатель попал в режим $s = 0$, для покрытия механических потерь необходим дополнительный приводной двигатель.

Для того чтобы получить из круговой диаграммы более точные данные при номинальных режимах работы, линию, на которой расположен центр круговой диаграммы, проводят не параллельно линии $-j$, а под углом 2γ (3.48), таким образом учитывается комплексный характер коэффициента \dot{C}_1 в схеме замещения асинхронной машины.

Диаметр окружности диаграммы токов асинхронной машины определяют по фазному напряжению и индуктивному сопротивлению короткого замыкания из уравнения (3.53), когда $\dot{I}_2' = 0$:

$$D_k = \frac{U_1}{x_k}. \quad (3.54)$$

Проводим окружность диаметром D_k с центром в точке O_k (рис. 3.25). На окружности определяем три характерные точки: $s = 0$ (идеальный холостой ход), $s = 1$ (короткое замыкание) и $s = \pm\infty$. При $s = 1$ r_{ks} по уравнению (3.51) равно активному сопротивлению короткого замыкания. На круговой диаграмме конец вектора тока \dot{I}_1 для этого сопротивления находится в точке B . При $s = \pm\infty$ $r_{ks} = r_1$, вектор тока располагается в точке C .

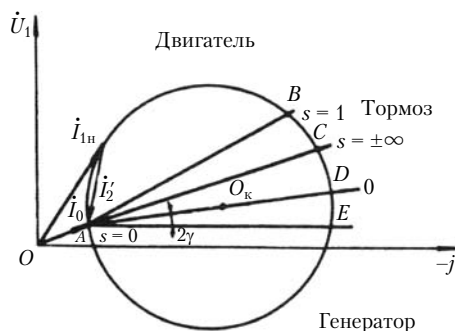


Рис. 3.25. Круговая диаграмма асинхронной машины

С помощью круговой диаграммы можно исследовать с достаточной точностью все статические характеристики асинхронной машины. Круговая диаграмма позволяет определить основные показатели машины во всех режимах работы. Все это можно сделать на стадии проектирования, не проводя испытаний машины.

На круговой диаграмме режим работы машины двигателем занимает дугу окружности AB от точки $s = 0$ до $s = 1$. Точка $s = 1$ соответствует трансформаторному режиму работы асинхронной машины. Тормозной режим занимает дугу BC , соответствующую скольжению от $s = 1$ до $s = \infty$. Генераторный режим работы асинхронной машины занимает нижнюю дугу окружности AC от точки $s = 0$ до $s = -\infty$.

После подключения к сети при увеличении нагрузки на валу асинхронная машина работает в двигательном режиме. При этом изменяется скольжение от $s = 0$ до $s = 1$, растёт ток \dot{I}_1 от $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$ до \dot{I}_k в точке $s = 1$, растёт и ток в роторе \dot{I}_2' , который можно определить из круговой диаграммы: $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$.

После того как двигатель остановился ($s = 1$), при дальнейшем увеличении активного момента сопротивления (например, при увеличении груза в подъёмном кране) ротор начинает вращаться против направления вращения поля и асинхронная машина перейдёт в тормозной режим. В большинстве случаев это кратковременный режим работы. В этом режиме и электрическая мощность, подводимая к статору машины, и механическая мощность, подводимая к валу, преобразуются в машине в тепло. В тормозном режиме машину часто используют для быстрого останова, изменяя направление вращения магнитного поля путем переключения порядка следования фаз. Поэтому этот режим называется также режимом противовключения.

Как было сказано выше, генераторный режим работы асинхронной машины на круговой диаграмме занимает нижнюю дугу от точки идеального холостого хода $s = 0$ до $s = -\infty$. Соответственно перевести машину из режима двигателя в генераторный режим можно путем изменения момента на валу. В генераторном режиме ротор вращается быстрее поля в том же направлении, что и поле. При этом машина отдаёт в сеть электрическую мощность, преобразуя механическую энергию в электрическую.

При переходе из режима двигателя в генераторный режим сначала разгружается двигатель, а затем за счёт момента на валу машина подводится к идеальному холостому ходу

($s = 0$). В этом режиме механические потери покрываются мощностью, которая поступает с вала от внешнего источника механической мощности. При дальнейшем увеличении момента машина переходит в генераторный режим, причем сначала активная мощность в сеть не отдается, а лишь покрываются потери в статоре ($P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{ст}}$), и лишь при увеличении s машина начинает отдавать электрическую мощность в сеть.

Следует иметь в виду, что «попасть» из генераторного режима в тормозной через точку C нельзя. Только на круговой диаграмме точки $s = \pm\infty$ совпадают. В реальных условиях асинхронную машину перевести из генераторного режима в тормозной можно путем уменьшения частоты вращения до нуля и перехода через режимы двигательный и короткого замыкания ($s = 1$).

Асинхронные машины общего назначения не рассчитаны для работы в длительном режиме при больших скольжениях, поэтому практическое значение имеет часть окружности в пределах скольжения $s \approx \pm 5 \div 10\%$.

Круговая диаграмма позволяет определять не только токи, но и моменты, мощности, потери и $\cos \varphi$, т.е. все основные показатели машины.

Построим упрощенную круговую диаграмму асинхронной машины (рис. 3.26). Линия центра диаграммы проведена параллельно оси $-j$. Так как для двигателей в несколько десятков киловатт коэффициент \dot{C}_1 можно с достаточной точностью принять равным единице, будем считать, что угол $2\gamma = 0$. Из конца вектора тока \dot{I}_1 опустим на линию AQ перпендикуляр DF . Тогда

$$DE = O_1 D \cos \varphi_1 = m_1^{-1} I_1 \cos \varphi_1,$$

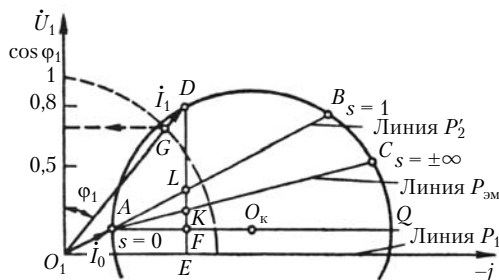


Рис. 3.26. Упрощенная круговая диаграмма

или

$$DE = mU_1 I_1 \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{m_p}, \quad (3.55)$$

где $m_p = mU_1 I_1$ — масштаб мощности.

Так как диаграмма строится в масштабе и для фазных значений токов и напряжений, DE будет пропорционален потребляемой из сети активной мощности P_1 . Каждый отрезок, параллельный \dot{U}_1 , в масштабе представляет собой ту или иную мощность. Так, отрезки DL и DK представляют собой в масштабе соответственно механическую мощность на валу машины P'_2 и электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$ (или мощность в воздушном зазоре). Это следует из того, что при $\dot{I}_1 = \dot{I}_k s = 1$, когда точка D совпадает с точкой B , отрезок DL равен нулю. При $s = 1$ мощность на валу также равна нулю.

Активная мощность, потребляемая из сети P_1 , расходуется на покрытие потерь в стали статора (отрезок FE), на покрытие электрических потерь в статоре (отрезок KF). Потери электрические в роторе представлены отрезком KL . Линия $O_1 E$ (линия $-j$) называется линией подведенной мощности P_1 , линия AC — линией электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$, а линия AB — линией механической мощности $P'_2 = P_2 + P_{\text{эм}}$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ по круговой диаграмме можно найти, измерив угол φ_1 . Удобнее, однако, построить шкалу $\cos \varphi_1$. Для этого единичным радиусом проводят окружность из точки O_1 и по точке пересечения G окружности с вектором тока \dot{I}_1 определяют $\cos \varphi_1$.

По круговой диаграмме можно определить также и скольжение. Для этого из центра диаграммы O_k проводят радиус к точке B ($s = \pm\infty$) и через точку B проводят касательную к окружности (рис. 3.27). Параллельно касательной проводят линию RT , которая является шкалой скольжения. Действительно, соединив точки C , B и R на шкале скольжения, получим точку, где $s = 1$. Точка $s = 0$ получается при пересечении линии RT с линией AC . Разделив отрезок RO на равные части, получим шкалу скольжения.

Чтобы определить скольжение для тока \dot{I}_1 , надо соединить конец вектора тока \dot{I}_1 с точкой C . Тогда при пересечении прямой DC со шкалой скольжения и определится скольжение для данной нагрузки. Так же определяется скольжение и в генераторном режиме. Для более точного определения s шкалу скольжения можно сместить влево параллельно самой себе.

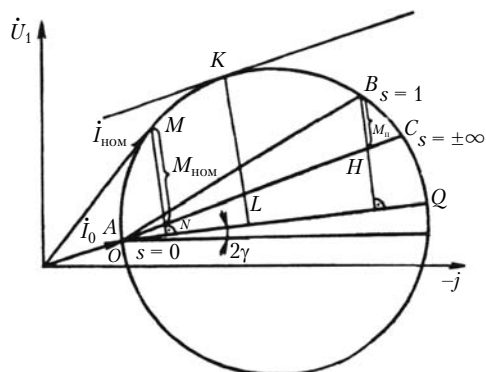


Рис. 3.28. Определение моментов по круговой диаграмме

и перегрузочную способность двигателя, или кратность максимального момента:

$$k_{\max} = \frac{KL}{MN} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{НОМ}}}. \quad (3.57)$$

С помощью круговой диаграммы можно построить зависимость момента от скольжения $M = f(s)$ — механическую характеристику асинхронной машины.

С помощью круговой диаграммы характеристики и основные параметры машины определяются не только для двигательного, но и для генераторного и тормозного режимов. При этом основные построения не изменяются.

Векторные диаграммы, схемы замещения и круговые диаграммы дают возможность достаточно точно и наглядно рассмотреть процессы электрохимического преобразования энергии в асинхронных машинах в установившихся режимах.

3.8. Построение круговой диаграммы по опытным данным. Рабочие характеристики

Если известны параметры схемы замещения, рабочие характеристики и кратности моментов можно определить расчетным путем, не прибегая к построению круговой диаграммы. Однако при изучении асинхронных машин и при контрольных испытаниях на заводах опытным путем определяют параметры схемы замещения и строят по опытным данным круговые диаграммы.

Круговую диаграмму строят на основе Г-образной схемы замещения.

Параметры схемы замещения находят с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания. Определив из двух опытов параметры схемы замещения и построив круговую диаграмму, можно получить рабочие характеристики.

Снятие опытным путем рабочих характеристик асинхронных двигателей часто представляет большие трудности: надо иметь нагрузочную машину, центрировать, градуировать ее показатели, собирать измерительную схему. Особенно трудно с достаточной точностью снимать рабочие характеристики асинхронных двигателей большой мощности. Провести опыт холостого хода и короткого замыкания значительно проще. При проведении опыта холостого хода машина работает в режиме двигателя, когда нагрузка на валу равна нулю. При $U_1 = U_{\text{ном}}$ и $f_{\text{ном}}$ измеряют ток холостого хода I_0 и потери P_0 . По данным измерений находят

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_1 I_0}. \quad (3.58)$$

У двигателей единых серий $I_0 = (0,25 \div 0,5) I_{\text{ном}}$, а $\cos \varphi_0 = 0,1 \div 0,2$. Для более точного определения значений I_0 и P_0 снимают зависимости I_0 , p_0 , $\cos \varphi_0$ от U_1 (рис. 3.29). Коэффициент мощности $\cos \varphi_0$ при увеличении U_1 из-за насыщения уменьшается. Потери растут примерно пропорционально квадрату напряжения; ток I_0 из-за насыщения изменяется по нелинейному закону. При холостом ходе потери

$$P_0 = P_{\text{э0}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}, \quad (3.59)$$

где $P_{\text{э0}}$ — электрические потери в обмотке статора.

Как и в трансформаторах, $P_{\text{э0}}$ можно легко рассчитать, зная r_1 . Потери электрические относительно невелики, так

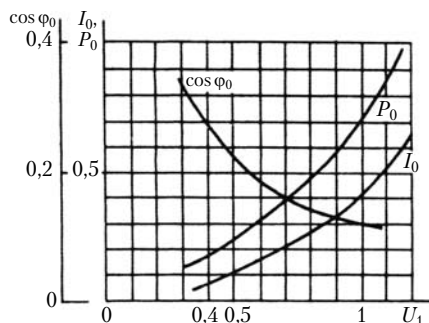


Рис. 3.29. Характеристики холостого хода асинхронного двигателя

как они пропорциональны квадрату тока, а ток I_0 меньше $I_{\text{ном}}$ в 3–4 раза. В асинхронных микродвигателях I_0 мало отличается от $I_{\text{ном}}$, поэтому при исследовании асинхронных двигателей небольшой мощности пренебрегать $P_{\text{э0}}$ не следует. Механические потери $P_{\text{мех}}$ не зависят от напряжения, так как частота

вращения в опыте холостого хода практически не изменяется.

Зная потери P_0 , можно разделить их на потери в стали $P_{ст}$ и механические $P_{мех}$. Для этого строят зависимость $P_0 = f(U_0^2)$ при $f = \text{const}$ (рис. 3.30). Так как $P_{ст} \sim U_1^2$, а $P_{мех} = \text{const}$, то из опыта холостого хода нетрудно найти $P_{ст}$ и $P_{мех}$.

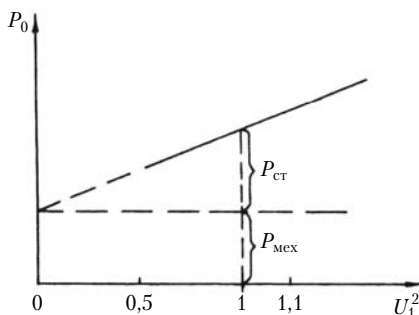


Рис. 3.30. Разделение потерь холостого хода асинхронного двигателя

Если необходимо учитывать $P_{э0}$, надо из P_0 для каждой точки вычитать $P_{э0}$, которые определяются расчетным путем:

$$P_{э0} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (3.60)$$

Для того чтобы ток холостого хода и потери холостого хода лежали в допустимых пределах, необходимо правильно рассчитать магнитную цепь машины при холостом ходе. При расчете магнитной цепи задаются индукцией в воздушном зазоре $B_\delta = 0,6 \div 0,8$ Тл. При этом максимальная индукция в зубцах $B_{з\max} = 1,6 \div 1,8$ Тл, так как сечение в зубцах примерно в 2 раза меньше, чем площадь зубцового деления. Для нескольких значений B_δ рассчитывают магнитную цепь и строят характеристику холостого хода.

При нагрузке поток в асинхронных двигателях из-за небольшого уменьшения ЭДС также уменьшается, но это изменение обычно в асинхронных машинах единых серий не учитывается.

Опыт короткого замыкания проводят при заторможенном роторе, замкнутой накоротко обмотке ротора и при пониженном напряжении, так, чтобы ток I_1 превышал номинальное значение не более чем в 1,2 раза. При этих условиях температура обмоток во время опыта не успеет превысить допустимые температуры для данного класса изоляции.

В опыте короткого замыкания снимают характеристики I_k , P_k , $\cos \varphi_k = f(U_k)$ при $f = \text{const}$ (рис. 3.31). Так как опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении, машина ненасыщена и $\cos \varphi_k = \text{const}$. Ток I_k зависит линейно от напряжения короткого замыкания. Потери короткого замыкания P_k — это в основном электрические потери в об-

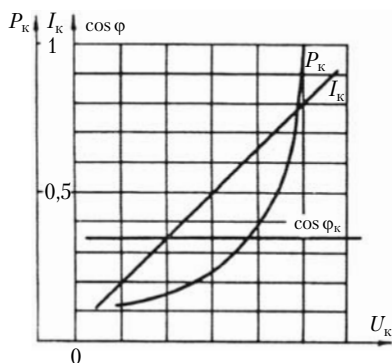


Рис. 3.31. Характеристики короткого замыкания асинхронного двигателя

мотках статора и ротора. Сопротивление короткого замыкания

$$r_K = \frac{P_K}{m_1 I_K^2}. \quad (3.61)$$

Потерями в стали можно пренебречь, так как опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении, $P_{ст} \sim U_1^2$, тогда

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{m_1 U_K I_K}, \quad (3.62)$$

где U_K, I_K — соответственно фазные напряжение и ток короткого замыкания. Из опыта короткого замыкания расчетным путем определяются

$$z_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad (3.63)$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (3.64)$$

Активное сопротивление r_K можно определить из формулы (3.61) или по формуле

$$r_K = z_K \cos \varphi_K. \quad (3.65)$$

Сопротивление обмотки статора можно найти, измерив напряжение и ток.

В опыте короткого замыкания фиксируется напряжение короткого замыкания, при котором ток I_1 равен номинальному. Считая, что характеристика намагничивания асинхронной машины линейная и x_1 и x_2 постоянные, ток короткого замыкания при номинальном напряжении определяем по отношению

$$I_{K, ном} = I_{1K} \left[\frac{U_{1ном}}{U_{1K}} \right], \quad (3.66)$$

где $I_{K, ном}$ — ток короткого замыкания при номинальном напряжении; $U_{1ном}$ — номинальное напряжение; I_{1K}, U_{1K} — ток и напряжение в опыте короткого замыкания.

В асинхронных двигателях ток короткого замыкания при номинальном напряжении $I_{1K} = (5 \div 7) I_{ном}$, поэтому $z_{K*} = 0,14 \div 0,2$.

Определив из опытов холостого хода и короткого замыкания все основные величины, перейдем к построению круговой диаграммы.

Выбрав масштабы токов и напряжений, найдем точку $s = 0$. Для этого построим вектор I_0 , найденный из опыта холостого хода. В точке $A' s \neq 0$, так как в машине есть механические потери и $P_{эм} \neq 0$. Чтобы найти точку $s = 0$, воспользуемся построениями, приведенными на рис. 3.24. При этом $\frac{A'E'}{E'E} = \frac{P_{мех}}{P_{ст}}$. Через точку E' проводим прямую, параллельную оси $-j$, на ней и будет располагаться точка A идеального холостого хода. Некоторая неточность определения положения точки A не приводит к заметным погрешностям при расчете основных параметров. Найдя точку $s = 0$, далее под углом φ_k проводим вектор $I_{к. ном}$ и определим точку $s = 1$ (рис. 3.32). При массовом производстве асинхронных двигателей единых серий на поточных линиях есть участок автоматического снятия характеристик каждого двигателя [1].

Потери короткого замыкания при номинальном напряжении

$$P_{к. ном} = P_k \frac{U_{1 ном}^2}{U_{1к}^2}, \quad (3.67)$$

где P_k — потери при напряжении $U_{1к}$ в опыте короткого замыкания.

Определив на плоскости $U_1, -j$ точки A , где $s = 0$, и B , где $s = 1$, соединим их и из середины AB опустим перпендикуляр на линию центров, круговой диаграммы AD . Линию AD проводим под углом 2γ к линии AE .

Чтобы найти на круговой диаграмме точку $s = \pm\infty$, надо из точки B опустить перпендикуляр на линию AE . Разделив

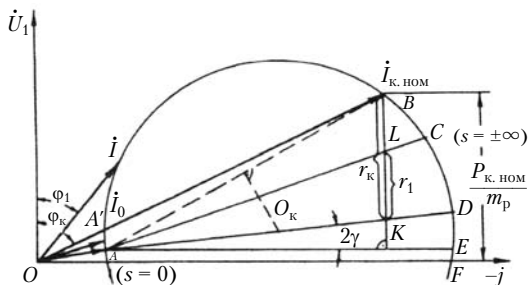


Рис. 3.32. Круговая диаграмма, построенная по опытным данным

прямую BK в отношении $BL: LK = r'_2 : r_1$, найдем точку C , где $s = \pm\infty$. Линия AC — линия электромагнитной мощности. В асинхронных двигателях единых серий обычно $r_1 \approx r'_2$, поэтому отрезок BK разделим примерно пополам. Линия AB — линия полезной мощности.

Построение круговой диаграммы по опытным данным не занимает много времени. Взяв на ней любую точку, можно определить необходимые параметры и построить рабочие характеристики.

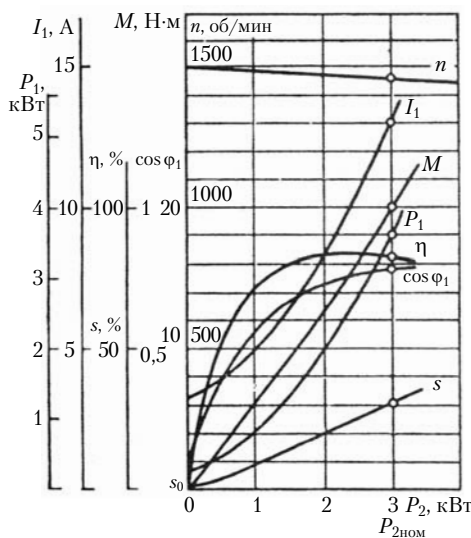


Рис. 3.33. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики двигателя — это зависимость потребляемой мощности P_1 , тока I_1 , $\cos \phi_1$, момента на валу M , скольжения и КПД от полезной мощности P_2 при постоянных номинальных напряжениях и частоте сети. Рабочие характеристики дают возможность судить об изменении основных параметров двигателя при изменении нагрузки от 0 до 1,1–1,3 номинального значения (рис. 3.33).

Задаваясь несколькими значениями мощности на валу P_2 , находим для этих точек значения токов I_1 , потребляемой из сети мощности P_1 и момент на валу M . По соответствующим шкалам после дополнительных построений определяем $\cos \phi_1$ и s . Коэффициент полезного действия приближенно находим как отношение $\frac{P_2}{P_1}$.

О распределении активной мощности, потребляемой из сети, можно судить по энергетической диаграмме двигателя (рис. 3.34). Забираемая из сети электрическая мощность P_1 расходуется в статоре на покрытие электрических потерь в обмотке статора

$$P_{\text{эл}} = m_1 I_1^2 r_1 \quad (3.68)$$

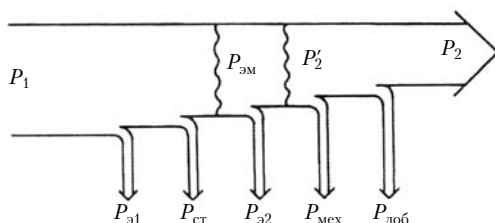


Рис. 3.34. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

и на покрытие потерь в стали магнитопровода статора

$$P_{ст} = k_{обр} p_{уд} G_{ст}, \quad (3.69)$$

где $p_{уд}$ — удельные потери в стали для максимальной индукции ярма и зубцов статора; $G_{ст}$ — масса ярма и зубцов магнитопровода; $k_{обр}$ — коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали за счет обработки, $k_{обр} = 1,3 \div 1,5$.

Потери в стали рассчитывают отдельно для ярма и зубцов, а затем их суммируют.

Электромагнитная мощность, или мощность в воздушном зазоре,

$$P_{эм} = P_1 - P_{э1} - P_{ст}. \quad (3.70)$$

Электромагнитная мощность расходуется на потери в роторе, а большая ее часть преобразуется в полезную механическую мощность P_2 :

$$P_2 = P_{эм} - \sum P = P_{эм} - P_{э2} - P_{мех} - P_{доб}, \quad (3.71)$$

где $P_{э2}$ — электрические потери в обмотке ротора,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 \quad (3.72)$$

или

$$P_{э2} = P_{эм} - P'_2 = M_{эм} (\omega_c - \omega_p) \frac{\omega_c}{\omega_p} = M_{эм} \omega_c s = P_{эм} s. \quad (3.73)$$

Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению:

$$P'_2 = P_{эм} - P_{э2} = P_{эм} - P_{эм} s = P_{эм} (1 - s). \quad (3.74)$$

Они включают в себя механическую мощность на валу P и механические потери $P_{мех}$. Механические потери рассчитываются по эмпирическим формулам. В механические потери входят потери на трение и мощность, расходуемая на вентиляцию.

Добавочные потери учитывают неточность в расчете потерь из-за насыщения и полей рассеяния. Их принимают равными 0,5% номинальной мощности. Расчет отдельных составляющих добавочных потерь при холостом ходе и нагрузке производится лишь для асинхронных машин большой мощности.

С ростом нагрузки растет ток I_1 , увеличиваются s и потребляемая мощность P_1 ; КПД и $\cos \phi_1$ имеют максимумы при $P_2 \approx 0,5 \div 0,8 P_{2\text{ном}}$. Выбор точки максимума КПД зависит от расчетчика, КПД имеет максимум в области, где постоянные потери ($P_{\text{ст}}$ и $P_{\text{мех}}$) равны переменным потерям — электрическим ($P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{э2}}$). Коэффициент полезного действия имеет пологий максимум в области $0,5-0,8 P_{2\text{ном}}$ (см. рис. 3.33), так как большинство асинхронных двигателей в электроприводах эксплуатируется при таких нагрузках. При нагрузках, близких к номинальной, и перегрузках, как это следует из круговой диаграммы, кривые I_1 , P_1 , M_2 отклоняются от линейного закона (см. рис. 3.33).

При $P_2 = 0$ $\cos \phi_1$ не равен нулю, так как из сети потребляется активная мощность, которая идет на покрытие потерь холостого хода. При $P_2 = 0$ I_1 , P_1 , s и M также не равны нулю, но имеют минимальные значения. При определении рабочих характеристик используется небольшой участок круговой диаграммы, поэтому получается приемлемая для практики точность.

Как и во всех электрических машинах, в асинхронных машинах преобразование электрической энергии в механическую сопровождается преобразованием электрической энергии в тепло, причем в асинхронных машинах электрические потери в роторе пропорциональны скольжению. Поэтому асинхронные машины экономичны при небольших скольжениях — 1–4%.

3.9. Точность круговой диаграммы

При построении круговой диаграммы был сделан целый ряд допущений, снижающих точность результатов. Основные допущения — переход от Т-образной схемы замещения к Г-образной и постоянство параметров при изменении скольжения в широких пределах.

При изменении нагрузки вследствие увеличения токов в асинхронной машине происходит насыщение зубцовой зоны, что приводит к изменению индуктивных сопротивле-

ний рассеяния. При больших токах из-за насыщения коронок зубцов происходит как бы дополнительное раскрытие паза (рис. 3.35), что влечет уменьшение индуктивных сопротивлений ротора и статора. Уменьшение x_k вызывает увеличение тока короткого замыкания и увеличение диаметра круговой диаграммы.

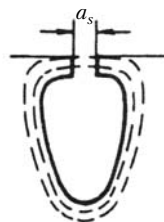


Рис. 3.35.

К вопросу насыщения зубцов

Изменение диаметра круговой диаграммы приводит к деформации окружности, по которой скользит конец вектора тока \dot{I}_1 (рис. 3.36). В первом приближении можно считать, что геометрическое место токов при учете изменения параметров есть линия перехода от окружности малого радиуса с центром в точке O_1 к окружности большого радиуса с центром в точке O_2 . Диаметр окружности с центром в точке O_2 получается при делении U_1 на значение насыщенного индуктивного сопротивления короткого замыкания при $s = 1$ ($x_{k \min}$), а диаметр малой окружности получается при делении U_1 на ненасыщенное значение $x_{k \max}$ при $s = 0$.

Линия перехода от одной окружности к другой является приближенным геометрическим местом токов асинхронной машины с учетом насыщения (см. рис. 3.36). Конечно, построение таких диаграмм тока более сложно, менее наглядно и связано со значительными погрешностями. Диаграммы тока, отличающиеся от окружности, в настоящее время в практических расчетах почти не применяются. Говоря о неточностях круговой диаграммы, следует подчеркнуть, что как схемы замещения, так и круговая диаграмма соответствуют уравнениям асинхронной машины

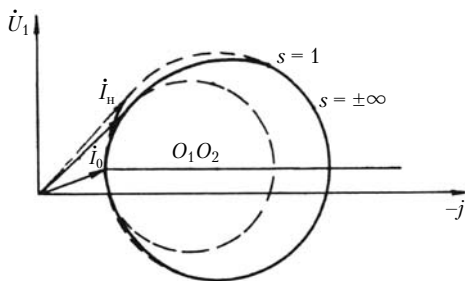


Рис. 3.36. Геометрическое место токов асинхронной машины с учетом насыщения

(3.15) и (3.27). Эти уравнения записаны для кругового поля в воздушном зазоре для машины с постоянными параметрами, имеющей по одной обмотке на статоре и роторе, т.е. эти уравнения соответствуют идеальной асинхронной машине.

В реальной асинхронной машине в воздушном зазоре имеется бесконечное число гармоник, параметры при изменении скольжения изменяются по нелинейным законам, а на роторе и статоре кроме обмоток еще есть несколько контуров, по которым могут замыкаться токи. К этим контурам относятся контуры вихревых токов, замыкающиеся по листам стали ротора и между листами стали из-за отсутствия изоляции, контуры, образующиеся за счет технологических факторов: шлифовки поверхности ротора, запрессовки магнитопровода ротора на вал, а магнитопровода статора — в станину, скрепления скобами пакетов магнитопровода и других причин. Все это оказывает влияние на характеристики машины, поэтому необходимо уметь учитывать и оценивать влияние этих факторов на статические и динамические характеристики.

Чтобы учесть влияние высших гармоник, наличие многих контуров на роторе и статоре, нелинейности параметров и других факторов, следует обратиться к уравнениям асинхронной машины и записать их с учетом этих факторов. Попытки уточнения схемы замещения и круговой диаграммы без уравнений, описывающих процессы преобразования энергии, не имеют научного обоснования.

В последние десятилетия ЭВМ широко применяются для решения уравнений электромеханического преобразования энергии, и этот путь является основным в развитии теории электрических машин. Развитие теории асинхронных машин позволяет записать уравнения для любого случая, встречающегося в практике электромашиностроения.

В настоящее время развитие теории электрических машин позволяет записать уравнения электромеханического преобразования энергии с учетом высших гармоник в воздушном зазоре, наличия нескольких обмоток, нелинейностей и других факторов [7]. В области анализа и синтеза электрических машин в последние десятилетия достигнуты большие успехи. Хотя схемы замещения и круговая диаграмма широко используются при практических расчетах, решение современных задач преобразования энергии в асинхронных машинах возможно только при применении ЭВМ. Изучая теорию электрических машин, следует в первую очередь научиться записывать уравнения для рассматриваемого случая электромеханического преобразования энергии.

3.10. Электромагнитный момент идеальной асинхронной машины

В установившемся режиме ускорение $\frac{d\omega_p}{dt} = 0$ и, как следует из уравнения (1.113), момент сопротивления M_c уравновешивается электромагнитным моментом $M_{эм}$, который развивает машина. Электромагнитный момент определяется несколькими способами.

Электромагнитный момент можно найти, если известна механическая мощность:

$$M_{эм} = \frac{P'_2}{\omega_p}. \quad (3.75)$$

Электромагнитный момент также определяется через электромагнитную мощность (мощность воздушного зазора) и угловую скорость поля ω_c :

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_c}, \quad (3.76)$$

если $\omega_c = 2\pi f_1$. При $\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p}$ $M_{эм} = \frac{pP_{эм}}{\omega_c}$. Так как из формул

(3.70) и (3.71) $P_{эм} = \frac{m_1(I'_2)^2 r'_2}{s}$, то

$$M_{эм} = \frac{pm_1}{\omega_c} (I'_2)^2 \frac{r'_2}{s}. \quad (3.77)$$

Из уравнений (3.3), (3.4) электромагнитный момент идеальной электрической машины, в которой нет высших гармоник, определяется как произведение токов:

$$M_{эм} = \frac{m}{2} M(i_{\beta}^{s_i r} - i_{\alpha}^{s_i r}). \quad (3.78)$$

Заменяя произведения токов и взаимной индуктивности в выражении (3.78) потокосцеплениями, $M_{эм}$ определяем через произведения потокосцеплений и токов [11]. Электромагнитный момент можно найти также через изменение энергии магнитного поля в воздушном зазоре машины:

$$M_{эм} = \frac{dW}{d\gamma}, \quad (3.79)$$

где W — энергия магнитного поля в воздушном зазоре; γ — угол поворота ротора относительно статора, соответствующий электрическому углу $\alpha = \gamma p$;

$$dW = \frac{B_0^2}{2\mu_0} dV,$$

где B_0 — индукция в элементе объема dV .

Энергия магнитного поля в зазоре определяется путем интегрирования по объему зазора $V = 2\pi R l_\delta \delta_0$:

$$W = \int_V \frac{B_0^2}{2\mu_0} dV. \quad (3.80)$$

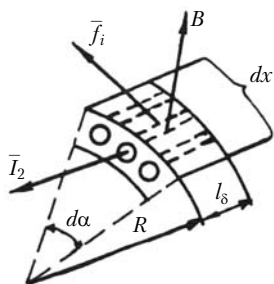


Рис. 3.37. К определению сил, действующих на ротор

Рассмотренные выше выражения (3.75)–(3.80) для определения электромагнитного момента дают интегральное значение момента. При проектировании электрических машин необходимо знать распределение усилий по поверхности ротора и статора машины.

На рис. 3.37 представлен элемент короткозамкнутого ротора асинхронной машины. Поверхностная плотность токового слоя

$$A_2 = \frac{I_2 N_2 \sqrt{2}}{2\pi R}, \quad (3.81)$$

где $I_2 = \frac{I_{2\max}}{\sqrt{2}}$ — ток в стержне обмотки ротора; N_2 — число стержней на роторе.

Ток в роторе и плотность токового слоя, как и индукция, распределяются по гармоническому закону (рис. 3.38, а):

$$B = B_m \sin \frac{x}{\tau_1} \pi; \quad A_2 = A_{2m} \sin \left[\frac{x}{\tau_1} \pi - \psi_2 \right].$$

На проводник с током, находящийся в магнитном поле с индукцией B , действует сила, н/м,

$$f_x = B_x A_x l_\delta. \quad (3.82)$$

Токовый слой в поле B на всей поверхности ротора создаст момент

$$M_{\text{эм}} = R \int_0^{2\tau_1} f_x dx, \quad (3.83)$$

где R — радиус ротора (см. рис. 3.37).

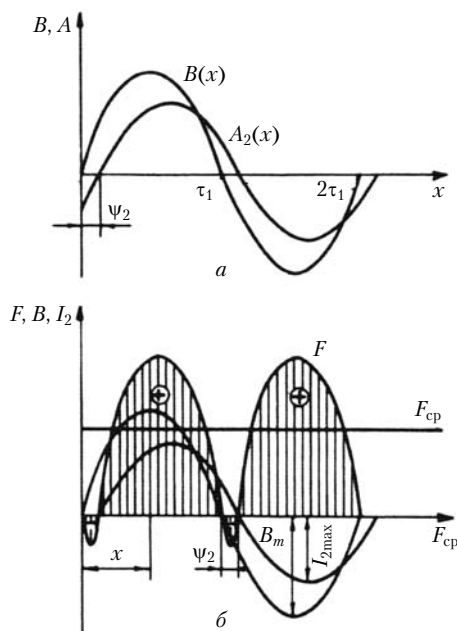


Рис. 3.38. Распределение электромагнитных сил по длине полюсного деления

Подставляя в выражение (3.83) значения A_2 и B и считая, что $dx = R d\alpha$, получаем

$$\begin{aligned}
 M_{\text{эм}} &= R l_{\delta} \int_0^{2\tau_1} B_m \sin \left[\frac{x}{\tau_1} \pi \right] A_{2m} \sin \left[\frac{x}{\tau_1} \pi - \psi_2 \right] dx = \\
 &= R^2 l_{\delta} \int_0^{2\pi} B_m \sin \left[\frac{x}{\tau_1} \pi \right] A_{2m} \sin \left[\frac{x}{\tau_1} \pi - \psi_2 \right] d\alpha = \\
 &= R^2 B_m A_{2m} l_{\delta} \frac{2\pi}{2} \cos \psi_2 = \pi R^2 l_{\delta} B_m A_m \cos \psi_2.
 \end{aligned} \quad (3.84)$$

Так как $\Phi_m = \frac{2}{\pi} B_m l_{\delta} \tau_1$, а $\tau_1 = \frac{2\pi R}{2p}$ и $B_m = \frac{\Phi_m p}{2l_{\delta} R}$, получим среднее значение электромагнитного момента

$$\begin{aligned}
 M_{\text{эм. ср}} &= \pi R^2 l_{\delta} B_m A_m \cos \psi_2 = \pi R^2 l_{\delta} \frac{\Phi_m p}{2l_{\delta} R} \frac{I_2 N_2 \sqrt{2}}{2\pi R} \cos \psi_2 = \\
 &= \frac{p N_2}{2\sqrt{2}} \Phi_m I_2 \cos \psi_2,
 \end{aligned} \quad (3.85)$$

где ψ_2 — угол между потоком Φ_m и ЭДС E_2 , а также между ЭДС и МДС и током в обмотке ротора I_2 .

Среднее значение силы при гармоническом распределении B и I_2

$$F_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B_m I_{2m} l_\delta \sin \alpha \sin(\alpha - \psi_2) d\alpha = \frac{1}{2} B_m I_{2m} l_\delta \cos \psi_2, \quad (3.86)$$

где B_m, I_{2m} — амплитудные значения индукции в воздушном зазоре и тока в роторе.

Электромагнитные силы и электромагнитный момент по поверхности ротора распределены неравномерно и изменяют направление (рис. 3.38, б).

Так как преобразование энергии в электрических машинах происходит в воздушном зазоре, где сосредоточена энергия магнитного поля, электромагнитный момент приложен к зубцам статора и ротора. Если магнитный поток проходит по зубцам, а в пазу поток равен нулю, то момент к обмотке не приложен. Обычно статор прикреплен к фундаменту и не перемещается, а вращается ротор машины. Если дать возможность вращаться и ротору, и статору, они будут вращаться в противоположные стороны, причем сумма угловых скоростей ротора и статора будет примерно равна ω_c — угловой синхронной скорости поля.

В практических расчетах широко применяется выражение для расчета $M_{эм}$, полученное из Г-образной схемы замещения (см. рис. 3.20):

$$\dot{I}_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left[r_1 + \dot{C} \frac{r_2'}{s}\right]^2 + (x_1 + \dot{C}_1 x_2')^2}}. \quad (3.87)$$

Так как $P_{э2} = P_{эм} s = \omega_c M_{эм} s$, то

$$M_{эм} = \frac{P_{э2}}{\omega_c s} = \frac{m_2 I_2'^2 r_2}{\omega_c s} = \frac{m_1 (I_2')^2 r_2'}{\omega_c s}. \quad (3.88)$$

Подставляя в выражение (3.88) значение тока I_2' , для двухполюсной машины получаем

$$M_{эм} = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{s \omega_c \left[\left[r_1 + C_1 \frac{r_2'}{s} \right]^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2 \right]}. \quad (3.89)$$

Рассматривается идеальная машина, поэтому можно, пренебрегая механическими потерями, считать, что $M_{\text{эм}}$ равен M — моменту на валу машины.

По формуле (3.89) построена механическая характеристика асинхронной машины $M = f(s)$ при U_1 и $f_1 = \text{const}$ (рис. 3.39). Механическая характеристика также представляет собой зависимость частоты вращения ротора от момента $n = f(M)$ или наоборот, $M = f(n)$.

Подставляя в формулу (3.89) различные значения s , можно получить зависимость $M = f(s)$ для всех режимов работы асинхронной машины. Согласно формуле (3.89) $M = 0$ при $s = 0$ и $s = \pm\infty$. Из формулы (3.89) следует, что момент имеет максимум при $s = \pm s_k$, т.е. при критическом скольжении. При увеличении скольжения от 0 до $\pm s_k$ момент растет, а затем уменьшается. При этом ток I'_2 продолжает расти, но растет реактивная составляющая, а активная уменьшается. За счет увеличения тока I_1 уменьшается ЭДС и поток машины.

Считая параметры постоянными, можно определить экстремумы, приравняв

$$\frac{dM_{\text{эм}}}{ds} = 0.$$

При этом критическое скольжение

$$s_k = \pm \frac{C_1 r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}}. \quad (3.90)$$

Подставляя значение s_k в формулу (3.89), определяем максимальный момент для многополюсной машины:

$$M_{\text{max}} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_c C_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}]}. \quad (3.91)$$

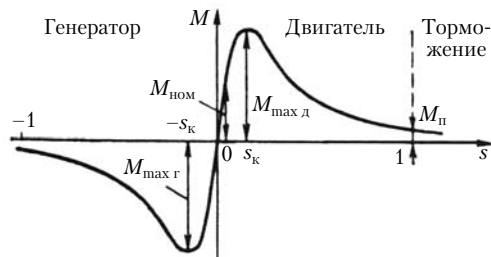


Рис. 3.39. Механическая характеристика асинхронной машины $M = f(s)$

Знак «+» перед формулой (3.91) и r_1 относится к двигательному, а знак «-» — к генераторному режимам.

Для асинхронных двигателей единых серий и асинхронных машин большой мощности можно считать, что $r_1 = 0$ и тогда

$$s_k = \pm \frac{C_1 r'_2}{x_1 + C_1 x'_2}, \quad (3.92)$$

а максимальный момент

$$M_{\max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_c C_1 (x_1 + C_1 x'_2)}. \quad (3.93)$$

Максимальный момент пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален $x_k = x_1 + x_2$. В формулах (3.91)

и (3.93) можно положить $C_1 = 1$ и считать, что $s_k = \pm \frac{r'_2}{x_k}$.

При $r_1 = 0$ и $C_1 = 1$ выражение для максимального момента имеет вид

$$M_{\max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_c x_k}. \quad (3.94)$$

Как следует из формулы (3.91), максимальный момент в генераторном режиме $M_{\max \text{ г}}$ несколько больше, чем в двигательном $M_{\max \text{ д}}$. Это объясняется тем, что в генераторном режиме r_1 принимается со знаком «-» и знаменатель формулы (3.91) меньше знаменателя в (3.91) для двигательного режима. Активное сопротивление ротора определяет s_k (3.92), и чем больше r'_2 , тем больше s_k смещается в область больших скольжений.

Кратность максимального момента $k_m = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 1,7 \div 3,0$. Более высокие значения k_m принадлежат двигателям с меньшим числом пар полюсов.

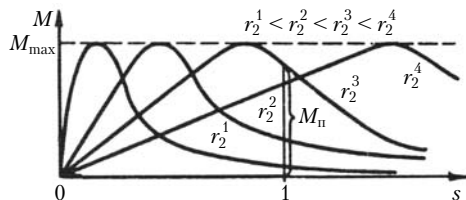


Рис. 3.40. Зависимость момента от скольжения при различных активных сопротивлениях ротора

На рис. 3.40 представлены зависимости момента от скольжения при изменении активного сопротивления ротора и $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$. При изменении r'_2 максимальный момент не изменяется, и при увеличении r'_2 максимум момента смещается в область больших скольжений. Увеличить активное сопротивление обмотки можно путем подключения добавочного резистора к фазной вторичной обмотке.

Установившееся значение пускового момента соответствует $s = 1$. Из выражения (3.89) пусковой момент

$$M_{\text{п}} = \frac{pt_1 U_1^2 r'_2}{\omega_c [(r_1 + C_1 x'_2)^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2]}. \quad (3.95)$$

Пусковой момент пропорционален квадрату напряжения и зависит от r'_2 . Смещая M_{max} за счет увеличения r'_2 , можно получить $M_{\text{max}} = M_{\text{п}}$. Это имеет место согласно формулам (3.93) и (3.95) при

$$r'_2 = \frac{1}{C_1} \sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x'_2)^2}. \quad (3.96)$$

В большинстве электроприводов желательно иметь пусковой момент близким к максимальному. Это обеспечивает механическая характеристика с повышенным сопротивлением в цепи ротора (кривая 1 на рис. 3.41). Однако в номинальном режиме при такой механической характеристике двигатель будет работать при большом скольжении, что связано с большими габаритами, потерями и низкими энергетическими показателями. Поэтому асинхронные двигатели с механической характеристикой 1 используются редко. Двигатели единых серий имеют механическую характеристику 2, обеспечивающую высокие энергетические показатели, когда $s_{\text{ном}} = 1 \div 4\%$.

Из анализа механических характеристик 1 и 2 следует, что наиболее благоприятной механической характери-

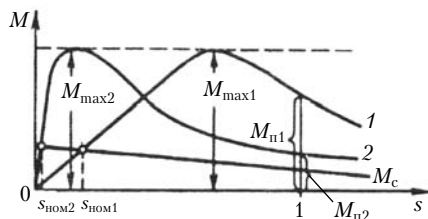


Рис. 3.41. Механическая характеристика асинхронного двигателя

кой была бы характеристика, сочетающая свойства характеристик 1 при пуске и 2 в номинальном режиме. Переход от характеристики 1 к характеристике 2 в асинхронных двигателях с фазным ротором достигается путем включения в обмотку ротора при пуске резистора и закорачивании обмотки ротора при работе в номинальном режиме. Двигатели с фазным ротором более дорогие и выпускаются для электроприводов с тяжелыми условиями пуска. В двигателях с короткозамкнутым ротором улучшенные пусковые характеристики получаются за счет применения пазов специального профиля, в которых происходит нелинейное изменение r'_2 при вытеснении тока в пазах.

Выражение (3.89) для определения механической характеристики громоздкое и для упрощенных расчетов неудобное. М. Клоссом была предложена простая формула для описания механической характеристики

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}. \quad (3.97)$$

По формуле Клосса характеристика $M = f(s)$ может быть построена с погрешностью 10–15%, если для каких-либо двух режимов работы известны M и s . Этими двумя режимами могут быть номинальный режим и режим пуска, данные которых приводятся в каталогах.

Для устойчивой работы асинхронного двигателя и производственного механизма необходимо определенное сочетание механических характеристик двигателя $M(n)$ и нагрузки $M_c(n)$. Двигатель устойчиво работает, когда

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_c}{dn}. \quad (3.98)$$

Этому условию соответствует точка 1 на рис. 3.42. После возмущения система возвращается в исходное положение, так как при увеличении частоты вращения M_c растет быстрее, чем момент двигателя M , и система возвращается в точку 1. При уменьшении n , наоборот, M_c уменьшается быстрее, чем момент двигателя, и система снова возвращается в точку 1.

Неустойчивый режим работы имеет место в точке 2, в которой

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_c}{dn}. \quad (3.99)$$

Для устойчивой работы двигателя важное значение имеет перегрузочная способность двигателя. При колебаниях напряжения сети и момента нагрузки двигатель продолжает работать, если имеется запас статической устойчивости, определяемый коэффициентом перегрузочной способности k_M , который в двигателях общепромышленного применения равен 1,7–2,2.

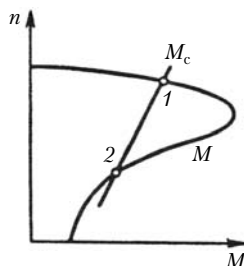


Рис. 3.42. К определению устойчивой работы двигателя

3.11. Влияние высших гармоник поля на момент асинхронной машины

В воздушном зазоре асинхронной машины существует бесконечный спектр гармоник поля. Высшие гармоники в воздушном зазоре можно разделить на *временные* и *пространственные*. Временные гармоники появляются в зазоре машины в основном из-за несинусоидальности и несимметрии питающего напряжения. Пространственные возникают из-за нелинейности параметров, наличия зубцов на статоре и роторе, несинусоидального распределения МДС и других технологических факторов. Хотя в зазоре асинхронной машины имеется бесконечное число гармоник, влияние на момент оказывает небольшое число гармоник, так как подавляющее число гармоник имеет бесконечно малые амплитуды.

Модель асинхронной машины с m гармониками в воздушном зазоре представлена на рис. 3.43. Каждая гармоника поля создает момент, который определяется произведением токов соответствующих гармоник в роторе и статоре. Направление момента зависит от направления вращения поля соответствующей гармоники. Общий электромагнитный момент определяется суммой моментов от каждой гармоники поля:

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{эм}1} + M_{\text{эм}2} + \dots + M_{\text{эм}i} + \dots + M_{\text{эм}m}. \quad (3.100)$$

Момент от i -й гармоники определяется произведениями токов i -х гармоник в статоре и роторе:

$$M_{\text{эм}i} = \frac{m}{2} M_i (i_{\alpha i}^r i_{\beta i}^s - i_{\alpha i}^s i_{\beta i}^r), \quad (3.101)$$

где M_i — взаимная индуктивность для i -й гармоники.

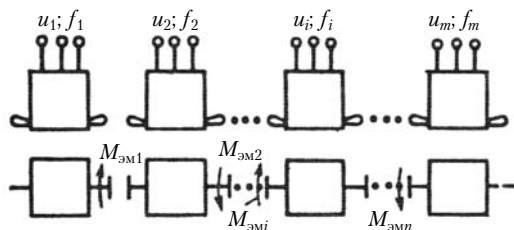


Рис. 3.43. К вопросу создания момента

Обычно число фаз i -й гармоники равно числу фаз 1-й гармоники.

Для пространственных гармоник частота вращения i -й гармоники в i раз меньше частоты вращения 1-й, основной гармоники, так как их число полюсов в i раз больше, чем у 1-й гармоники (см. параграф 1.7). Поэтому синхронная частота вращения для 3-й гармоники в 3 раза меньше частоты вращения 1-й гармоники, для 5-й — в 5 раз, для 7-й — в 7 раз и т.д.

При пуске в ход ротор двигателя будет проходить синхронные частоты вращения высших пространственных гармоник. При этом результирующая кривая момента будет искажаться вследствие наложения на основную кривую момента $M_{эм1}$ моментов от высших гармоник (рис. 3.44). При $f = 50$ Гц и $p = 1$ $n_{с1} = 3000$ об/мин для 5-й гармоники $n_c = 600$ об/мин, для 7-й $n_c \approx 429$ об/мин и т.д.

Результирующая кривая момента вблизи точки $s = 1$ искажается и имеет провалы (см. рис. 3.44). При проектировании машины следует обеспечить наименьшие искажения кривой $M = f(s)$, так как провалы в кривой момента могут привести к тому, что при разгоне ротор двигателя «застрянет» вблизи синхронной частоты вращения одной из высших гармоник, имеющей большую амплитуду. Если кривая момента сопротивления M_c пересекается с результирующей кривой момента вблизи $s = 1$ (точка б), двигатель будет устойчиво работать на промежуточной частоте вращения, не дойдя до номинальной частоты вращения

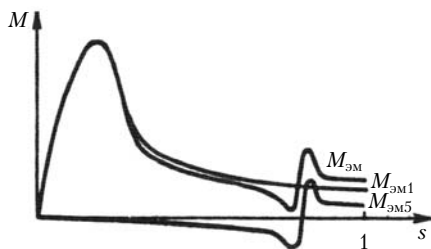


Рис. 3.44. Влияние 5-й гармоники (M_{35}) на результирующий момент, M_{31} — момент 1-й гармоники

(точка *a* на рис. 3.45). Обычно этот режим является весьма нежелательным, так как имеют место большие потери в роторе $P_{\text{э2}}$ из-за большого скольжения по 1-й гармонике.

Чтобы уменьшить провалы в кривой момента, надо уменьшить амплитуды высших гармоник поля в воздушном зазоре. Для этого необходимо стремиться распределение МДС выполнять близким к синусоиде, выбирать определенные соотношения чисел зубцов на роторе и статоре, делать скос пазов и выбирать необходимое раскрытие пазов, т.е. принимать все меры к уменьшению амплитуд высших гармоник поля. Кривая момента идеальной машины является лучшей, и к ней стремятся при проектировании асинхронных машин.

Моменты высших гармоник, действующие на ротор асинхронной машины, называются добавочными. Их можно разделить на асинхронные, синхронные, гистерезисные и реактивные. Кроме этих моментов возникают моменты, вызванные радиальными вибрационными силами.

Асинхронные моменты от высших гармоник по своему действию сходны с моментом основной гармоники, но имеют меньшие амплитуды и меньшие синхронные скорости. Поля статора и ротора, созданные токами высшей гармоники, неподвижны относительно друг друга. Механическая частота вращения ротора для всех гармоник одна и та же, поэтому скольжение для ν -й гармоники

$$s_{\nu} = \frac{\omega_{\text{св}} - \omega_{\text{р}}}{\omega_{\text{св}}}, \quad (3.102)$$

где $\omega_{\text{св}}$ — синхронная угловая скорость для ν -й гармоники.

Определение влияния добавочных моментов на характеристики машины связано с решением на ЭВМ систем уравнений типа (3.3), (3.4) для нескольких гармоник или в упрощенном виде по схеме замещения для каждой ν -й гармоники. Схема замещения для ν -й гармоники имеет тот же вид, что и для 1-й, но необходимо определить параметры для ν -й гармоники.

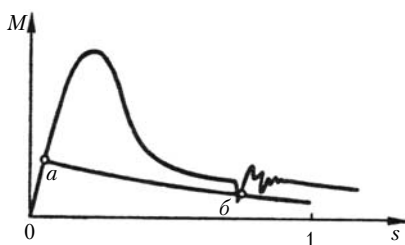


Рис. 3.45. Влияние провалов в характеристике $M = f(s)$ на разгон двигателя до номинальной частоты вращения

Момент ν -й гармоники можно найти, если известна электромагнитная мощность ν -й гармоники:

$$M_\nu = \frac{P_{\text{эм}\nu}}{\omega_{\text{св}}} = \frac{P_{\text{э}2\nu}}{s_\nu \omega_{\text{св}}}, \quad (3.103)$$

где $P_{\text{эм}\nu}$ — электромагнитная мощность ν -й гармоники; $P_{\text{э}2\nu}$ — электрические потери в роторе от ν -й гармоники.

Так же, как и при определении электромагнитного момента по 1-й гармонике (3.76), $M_\nu = \frac{pP_{\text{эм}\nu}}{\omega_{\text{св}}}$, когда $\omega_{\text{св}} = 2\pi f_1$, или M_ν по формуле (3.103), когда $\omega_{\text{св}} = \frac{2\pi p f_1}{p\nu}$.

Добавочные асинхронные моменты играют значительную роль в асинхронных машинах с короткозамкнутым ротором, так как в них образуются контуры для токов высших гармоник. В машинах с фазным ротором влияние асинхронных добавочных моментов существенно меньше, так как в них практически отсутствуют контуры, где могли бы замыкаться токи высших гармоник.

Синхронные моменты появляются в асинхронных машинах, когда частота вращения одной из высших гармоник совпадает с частотой вращения ротора или кратна ей. Во время пуска ротор проходит синхронные скорости высших гармоник и может «застыть», если синхронный момент достаточно велик (см. рис. 3.45). Синхронный момент создает глубокие провалы в кривой момента в узкой области частоты вращения ротора, но за счет накопленной кинетической энергии ротора обычно застревания не наблюдается.

Синхронные моменты от зубцовых гармонических статора и ротора наиболее неблагоприятны при условиях $z_1 = z_2$ и $z_2 - z_1 = \pm 2p$. При $z_1 = z_2$ совпадают частоты гармоник, вращающихся в одну и ту же сторону, а во втором случае — частоты гармоник, вращающихся в противоположные стороны. Совпадение частот вращения гармоник при $z_1 = z_2$ может иметь место при неподвижном роторе, и если момент сопротивления велик, а основной момент небольшой, двигатель не будет разгоняться.

Реактивные моменты возникают из-за различной магнитной проводимости, обусловленной наличием зубцов на статоре и роторе. Ферромагнитное тело в магнитном поле стремится занять положение, соответствующее наименьшему магнитному сопротивлению. Наибольшие реактивные

моменты имеют место при $z_1 = z_2$ (рис. 3.46). Реактивный момент может возникать при наличии обмотки только на статоре или роторе. Реактивный момент возникает при гладком статоре или роторе, когда полюсное деление зубцовой гармонической τ_v совпадает с зубцовым делением ротора $t_{z2} =$

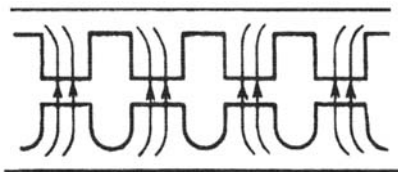


Рис. 3.46. Возникновение синхронных реактивных моментов в асинхронном двигателе

$= \frac{2\pi R}{z_2}$. Реактивные моменты могут оказывать вредное влияние, но могут использоваться и для получения положительных технических эффектов.

Кроме рассмотренных моментов в асинхронных машинах могут возникать гистерезисный момент и момент от вихревых токов. Следует отметить, что возникновение потерь в роторе связано с возникновением моментов. Потери в стали также создают момент. Потери в стали делятся на потери на перемагничивание — на гистерезис и на вихревые токи. Потери в стали в роторе создаются как от основной, так и от высших гармоник. Несмотря на то что амплитуды высших гармоник небольшие, за счет высокой частоты они могут создавать потери в стали ротора, соизмеримые при номинальном режиме с потерями от основной гармоники. При небольших скольжениях частота в роторе 1–2 Гц и при расчете КПД двигателей единых серий потерями в стали в роторе пренебрегают.

Гистерезисный момент M_g зависит от скольжения, как это показано на рис. 3.47. Там же представлена зависимость момента вихревых токов M_v от скольжения. Момент от ви-

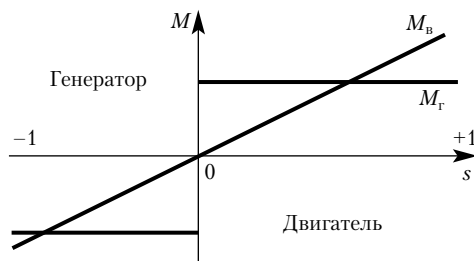


Рис. 3.47. Гистерезисный момент и момент от вихревых токов

хревых токов подробно рассматривается в параграфе 3.12. Гистерезисный момент при переходе через синхронную частоту вращения изменяет знак, а затем не зависит от скольжения. В асинхронных машинах единых серий гистерезисный момент практически не оказывает влияния на работу машины.

Применяя специальные магнитные материалы, можно в микродвигателях получить достаточно большие гистерезисные моменты. Гистерезисные двигатели рассмотрены в параграфе 4.23.

Как правило, создавая электрические машины, стремятся уменьшить амплитуды высших гармоник поля в воздушном зазоре асинхронной машины, но иногда, наоборот, создают благоприятные условия для одной из высших пространственных гармоник, уменьшая момент от 1-й гармоники. Часто в электроприводах необходимо иметь низкие частоты вращения приводного механизма без применения механического редуктора. Это можно обеспечить в многополюсных и редукторных двигателях, работающих на одной из пространственных гармоник поля.

Создать благоприятные условия для 5-й или 7-й гармоники и сделать одну из них основной, имеющей наибольшую амплитуду, можно путем выбора определенного соотношения числа пазов на роторе и статоре. Для этого момент от 1-й гармоники уменьшается за счет укорочения шага обмотки, а амплитуда высшей гармоники искусственно увеличивается. Например, если шаг обмотки $y \approx 0,1\tau$ или $y \approx 2\tau$,

ЭДС 1-й гармоники при таком укорочении стремится к нулю.

Рассмотренные выше вращающие моменты создаются тангенциальными силами F_t , действующими вдоль касательной к окружности ротора. Наряду с тангенциальными силами в машине есть радиальные силы F_p , создающие тяжения и действующие вдоль радиуса ротора (рис. 3.48).

Обращаясь к модели асинхронной машины (см.

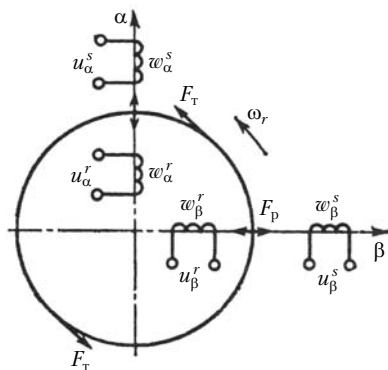


Рис. 3.48. К определению тангенциальных и радиальных сил в электрических машинах

рис. 3.48), следует подчеркнуть, что тангенциальные силы создаются произведениями токов, протекающих в обмотках статора и ротора в различных осях ($i_{\beta}^s i_{\alpha}^r$ и $i_{\alpha}^s i_{\beta}^r$), а радиальные силы создаются произведениями токов статора и ротора, принадлежащих обмоткам, расположенным на одних осях ($i_{\alpha}^r i_{\alpha}^s$ и $i_{\beta}^r i_{\beta}^s$).

В идеальной машине, имеющей равномерный воздушный зазор, радиальные силы не влияют на результирующий вращающий момент, так как произведения токов в статоре и роторе по одной оси $i_{\alpha}^r i_{\alpha}^s - i_{\beta}^r i_{\beta}^s$ равны друг другу и не создают тяжения. В реальной машине, имеющей неравномерный зазор и люфты в подшипниках, радиальные силы создают вибрации и шумы.

При скосе пазов, несимметричном расположении статора и ротора в аксиальном направлении появляются тяжения, направленные вдоль оси машины (рис. 3.49). Эти силы стремятся поставить ротор в симметричное положение относительно статора. Аксиальные силы F_a воздействуют на подшипники и также являются источниками вибрации и шума. Небольшие несоосности статора и ротора в серийных машинах исключаются путем применения роликовых подшипников или свободного закрепления одного из шариковых подшипников.

Наличие в машине аксиальных и радиальных сил используется в специальных машинах для получения возвратно-поступательного движения ротора, а также для генерирования колебаний в виброприводах и других механизмах.

Электромагнитные моменты приложены к статору и ротору, так как электромеханическое преобразование энергии происходит в воздушном зазоре. Если дать возможность вращаться ротору и статору, они будут перемещаться в противоположных направлениях.

Высшие гармоники поля наряду с 1-й гармоникой оказывают влияние на моменты, действующие в аксиальном направлении, и на радиальные силы. Изучение этих сложных взаимодействий выходит за рамки данного курса.

В реальной машине нельзя избавиться от высших гармоник, их амплитуды можно только уменьшить. Как правило,

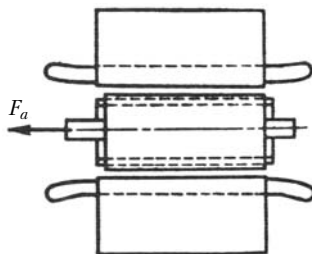


Рис. 3.49. Возникновение аксиальных сил

учет влияния высших гармоник на процессы преобразования энергии в электрических машинах связан со сложными уравнениями, которые решают с помощью ЭВМ [4].

3.12. Влияние вихревых токов на момент асинхронной машины

В асинхронных машинах вращающееся поле создается токами, протекающими в обмотке статора. Вращающееся поле наводит в обмотке ротора и во всех дополнительных контурах на роторе и статоре так называемые вихревые токи. Вихревые токи участвуют в создании электромагнитного момента, так как частоты их в роторе и статоре находятся в том же соотношении, что и для рабочих токов, а поля вихревых токов ротора и основной обмотки неподвижны относительно друг друга. Вихревые токи наводятся также и высшими гармониками поля воздушного зазора. Вихревые токи замыкаются в листах стали магнитопроводов статора и ротора, в контурах, образующихся при заливке короткозамкнутой обмотки и листами стали ротора, а также в контурах, образующихся при шлифовке, запрессовке и креплении пакетов магнитопроводов ротора и статора.

Таким образом, обычную асинхронную машину надо рассматривать как многообмоточную, имеющую несколько контуров на роторе и статоре.

Учет влияния вихревых токов необходим при расчете динамических режимов и в установившихся режимах при работе машин в широком диапазоне изменения скольжения, а также для двигателей повышенной частоты.

Установлено, что из всего многообразия контуров роторных вихревых токов в большей степени влияние на вращающий момент оказывают контуры, образованные стержнями клетки и сталью ротора.

Чтобы разобраться во взаимодействии многих токов, протекающих в контурах машины, надо иметь математическую модель, описывающую процессы электромеханического преобразования энергии в многообмоточных электрических машинах.

Уравнения многообмоточных машин имеют важное значение в теории электрических машин, так как большинство машин имеет по несколько обмоток (синхронные машины, машины постоянного тока). Асинхронные машины также могут иметь несколько обмоток, например двигатели

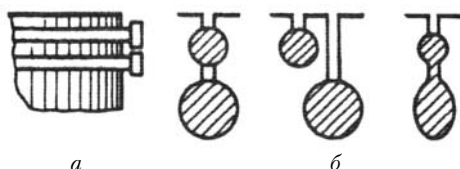


Рис. 3.50. Ротор двигателя с двойной беличьей клеткой (а), формы пазов и возможные выполнения обмотки (б)

с двойной беличьей клеткой (рис. 3.50). Математическое описание процессов в многообмоточных машинах можно применять для анализа распределения токов в массивных частях машины, в параллельных ветвях обмоток и т.п.

Математической моделью многообмоточной асинхронной машины является обобщенный электромеханический преобразователь энергии — m , n -обмоточная двухфазная машина (см. рис. 1.33). В этой машине на статоре m обмоток, а на роторе n . Рассмотрим двухфазную машину, так как в двухфазной машине меньше уравнений напряжения, чем в трехфазной, а симметричные трехфазные машины легко приводятся к двухфазным (см. параграф 1.13).

Уравнения m , n -обмоточной машины подробно рассматриваются в работе [7]. Здесь же рассмотрим уравнения самой простой из многообмоточных машин — асинхронной машины с одной обмоткой на статоре ($w_{1\alpha}^s, w_{1\beta}^s$) и двумя обмотками на роторе ($w_{1\alpha}^r, w_{1\beta}^r, w_{2\alpha}^r$ и $w_{2\beta}^r$) (рис. 3.51). Эта модель позволяет учесть влияние вихревых токов ротора на характеристики машины. Можно n контуров вихревых токов ротора, упрощая картину распределения токов в роторе, привести к одной эквивалентной обмотке. Конечно, это большое упрощение, но при нелинейной зависимости параметров эквивалентной обмотки от скольжения такое допущение не приводит к большим расхождениям расчета с экспериментом.

Уравнения машины с одной обмоткой на статоре и двумя на роторе можно представить в матричной форме:

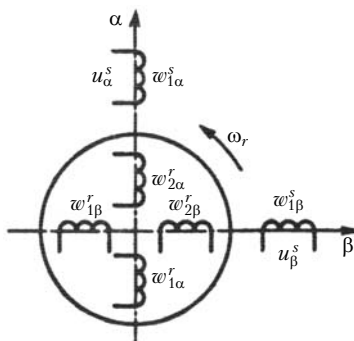


Рис. 3.51. Модель машины с одной обмоткой на статоре и двумя на роторе

$$\begin{vmatrix} u_{1\alpha}^s \\ u_{1\alpha}^r \\ u_{2\alpha}^r \\ u_{1\beta}^r \\ u_{2\beta}^r \\ u_{1\beta}^s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{1\alpha}^s + \frac{d}{dt}L_{1\alpha}^s & \frac{d}{dt}M_{11} & \frac{d}{dt}M_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}M_{11} & R_{1\alpha}^r + \frac{d}{dt}L_{1\alpha}^r & \frac{d}{dt}M_{12}^r & L_{1\beta}^r\omega_p & M_{12}^r\omega_p & M_{11}\omega_p \\ \frac{d}{dt}M_{21} & \frac{d}{dt}M_{21}^r & R_{2\alpha}^r + \frac{d}{dt}L_{2\alpha}^r & M_{21}\omega_p & L_{2\beta}^r\omega_p & M_{21}\omega_p \\ -M_{11}\omega_p & -L_{1\alpha}^r\omega_p & -M_{12}^r\omega_p & R_{1\beta}^r + \frac{d}{dt}L_{1\beta}^r & \frac{d}{dt}M_{12}^r & \frac{d}{dt}M_{11} \\ -M_{21}\omega_p & -M_{21}^r\omega_p & -L_{2\alpha}^r\omega_p & \frac{d}{dt}M_{21}^r & R_{2\beta}^r + \frac{d}{dt}L_{2\beta}^r & \frac{d}{dt}M_{21} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d}{dt}M_{11} & \frac{d}{dt}M_{12} & R_{1\beta}^s + \frac{d}{dt}L_{1\beta}^s \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{1\alpha}^s \\ i_{1\alpha}^r \\ i_{2\alpha}^r \\ i_{1\beta}^r \\ i_{2\beta}^r \\ i_{1\beta}^s \end{vmatrix}; \quad (3.104)$$

$$M_{\text{эм}} = M_{11}(i_{1\alpha}^r i_{1\beta}^s - i_{1\alpha}^s i_{1\beta}^r) + M_{12}(i_{2\alpha}^r i_{1\beta}^s - i_{1\alpha}^s i_{2\beta}^r). \quad (3.105)$$

Электромагнитный момент состоит из двух составляющих: $M_{\text{эм}} = M_{11} + M_{12}$, где M_{11} — момент от произведения токов в обмотке статора и первой обмотке ротора, а M_{12} — момент от токов в обмотке статора и второй обмотке ротора.

Система уравнений (3.104) и (3.105) описывает процессы в трехобмоточной асинхронной машине в переходных и установившихся режимах. Уравнения установившегося режима получаются из системы (3.104) заменой $\frac{d}{dt} \Rightarrow j\omega$. На рис. 3.52 представлена результирующая механическая характеристика асинхронной машины с двумя обмотками на роторе. Сопротивление обмотки ротора, эквивалентной вихревым токам, большое, и критическое скольжение ее лежит в области больших скольжений, а активное сопротивление первой рабочей обмотки небольшое.

Следует обратить внимание на то, что механическая характеристика имеет минимальный момент $M_{\text{мин}}$, который меньше пускового момента. Наличие $M_{\text{мин}}$ объясняется влиянием вихревых токов и высших гармоник, причем влияние вихревых токов является определяющим. $M_{\text{мин}}$ должен быть не меньше $0,8M_{\text{п}}$.

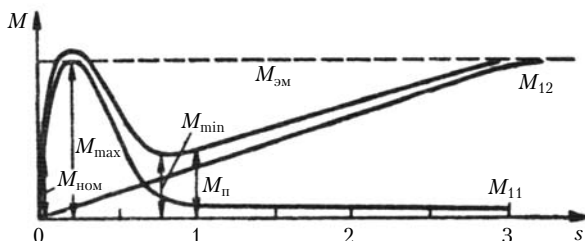


Рис. 3.52. Влияние вихревых токов на механическую характеристику

Механическая характеристика с минимальным сопротивлением M_{11} и механическая характеристика с предельным сопротивлением M_{12} (см. рис. 3.52) ограничивают все возможные механические характеристики, которые могут быть получены при изменении числа обмоток, их активных и индуктивных сопротивлений, изменяющихся по нелинейным законам. Теоретически диапазон механических характеристик занимает область $M = f(s)$ при $r'_2 \approx 0$ и $r'_2 \approx \infty$. К этим условиям приближается ротор Шенфера, который представляет собой массивный стальной цилиндр с профрезерованными пазами, в которых лежит короткозамкнутая медная обмотка.

Уравнения (3.104) и (3.105) являются уравнениями двухклеточного двигателя без учета вихревых токов. Для учета вихревых токов в роторе двухклеточного двигателя можно условно ввести на ротор третью обмотку. Двигатели с двойной беличьей клеткой имеют улучшенные пусковые характеристики.

Уравнения (3.104) и (3.105) моделируются на цифровой ЭВМ. Вычислительные машины позволяют оптимизировать параметры обмоток и получить желаемый вид статических и динамических характеристик.

Двигатели с шихтованным ротором и короткозамкнутой обмоткой изготавливаются до частот вращения 5000—6000 об/мин. Чтобы обеспечить механическую прочность ротора при больших частотах вращения, роторы асинхронных высокоскоростных двигателей выполняют стальными, без пазов, а вал и магнитопровод изготавливают из одной заготовки. Такие двигатели получили название асинхронных двигателей с массивным ротором. Асинхронные двигатели с массивным ротором применяются в специальных случаях, так как имеют низкие энергетические показатели и более трудоемки.

В массивном роторе токи замыкаются по стали и активное сопротивление r'_2 больше, чем у двигателей с короткозамкнутой обмоткой из меди или алюминия. У двигателей

с массивным ротором критическое скольжение $s_k \approx \frac{r'_2}{x_k}$ лежит в области $s_k \approx 3 \div 4$ и механическая характеристика имеет вид рис. 3.53. Номинальное скольжение у двигателей с массивным ротором значительно больше, чем у двигателей общего назначения, и поэтому электрические потери в роторе большие. Низкие КПД и $\cos \phi$ двигателей с массивным ротором ограничивают их применение.

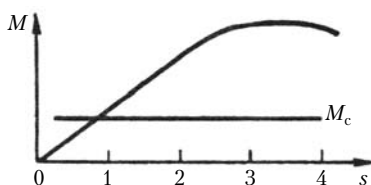


Рис. 3.53. Механическая характеристика двигателя с массивным ротором

Упрощенная схема путей магнитного потока и распределения вихревых токов в поверхностном слое массивного ротора дана на рис. 3.54. В массивном роторе токи и магнитный поток замыкаются по стали, а обмотки и магнитопровод совмещены. При изменении скольжения и частоты токов в роторе происходит перераспределение токов и большая часть тока при увеличении нагрузки и скольжения вытесняется к поверхности ротора.

Из-за сильного поверхностного эффекта вихревые токи протекают в сравнительно тонком слое. Эквивалентная глубина проникновения зависит от частоты тока в роторе, а также от свойств ферромагнитного материала: μ_r — относительной магнитной проницаемости и ρ — удельного электрического сопротивления. Следует отметить, что путем выбора ферромагнитных материалов получить нелинейное изменение параметров ротора в широких пределах не удастся.

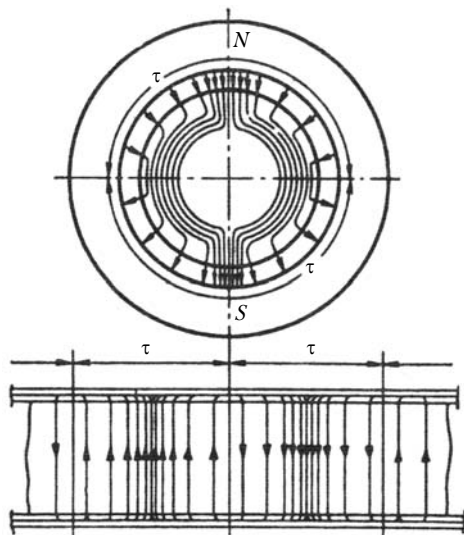


Рис. 3.54. Упрощенная схема путей магнитного потока и распределение вихревых токов в поверхностном слое массивного ротора

В ферромагнитном роторе, выполненном из стали марки Ст3, при $s = 1$ и $f = 50$ Гц глубина проникновения 1—3 мм. При номинальном скольжении $s = 0,05 \div 0,1$ глубина проникновения 5—15 мм. В первом приближении можно считать, что глубина проникновения обратно пропорциональна \sqrt{s} .

Подобно тому, как это имело место в асинхронных двигателях с глубоким пазом, при пуске активное сопротивление массивного ротора большое, а индуктивное сопротивление рассеяния — небольшое. С уменьшением скольжения активное сопротивление ротора уменьшается, а индуктивное сопротивление рассеяния увеличивается.

Для улучшения энергетических характеристик двигателя с массивным ротором применяют омеднение ротора. Уменьшение активного сопротивления за счет омеднения снижает номинальное скольжение и приводит к повышению КПД. Иногда на массивном роторе фрезеруют пазы и выполняют медную клетку. Такой ротор был предложен К. И. Шеффером и носит его имя.

Чтобы уменьшить момент инерции двигателя с ферромагнитным ротором, можно его выполнить в виде стакана, у которого толщина стенок равна глубине проникновения в рабочих режимах. Однако из-за низких энергетических показателей и магнитного тяжения ротора к статору такие двигатели не нашли широкого применения.

Теория асинхронного двигателя с массивным ротором может быть изложена с тех же позиций, что и для асинхронных машин общего назначения. Массивный ротор можно разбить на ряд слоев и рассмотреть его состоящим из n полых цилиндров (рис. 3.55). Тогда математической моделью двигателя с массивным ротором будет модель многообмоточной машины с m , n -обмотками (см. рис. 1.30). Упрощая ее, можно прийти к обычной модели машины с одной обмоткой на статоре и одной обмоткой на роторе. В отличие от машин общего назначения сопротивление обмотки ротора при изменении скольжения будет меняться в большей степени по нелинейным законам. Основная трудность состоит в определе-

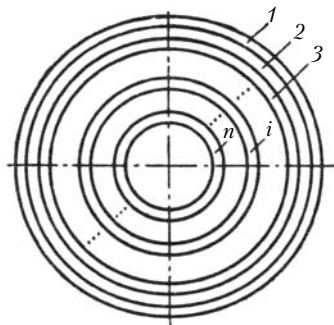


Рис. 3.55. Массивный ротор, состоящий из n слоев

нии нелинейных зависимостей активного и реактивного сопротивлений массивного ротора. Подробно теория двигателя с массивным ротором рассматривается в спецкурсах.

3.13. Учет нелинейности параметров в статических режимах

В уравнения электромеханического преобразования энергии (1.100) и (1.105) входят пять параметров (r_1 , r_2 , L , L_2 , M) и момент инерции J . В статических режимах, когда $\omega_p = \text{const}$, момент инерции J , который входит в уравнение движения, не оказывает влияния на процессы преобразования энергии, так как $J \frac{d\omega_p}{dt} = 0$. Поэтому на работу асинхронной машины в установившихся режимах могут влиять изменения активных и индуктивных сопротивлений.

Активные сопротивления могут изменяться за счет вытеснения тока и изменения температуры. Изменения r_1 и r_2 вследствие изменения температуры, как правило, являются медленными и обычно не учитываются. При снятии характеристик необходимо сначала довести машину до установившейся температуры, дав ей поработать 1 ч, а затем снимать характеристики. Вытеснение тока в проводниках обмотки статора незначительно при частоте 50 Гц, а изменение сопротивления обмотки ротора при пуске оказывает значительное влияние на процесс разгона двигателя и используется для получения желаемого вида механической характеристики. Хотя процесс пуска двигателя относится к переходным процессам и рассматривается в параграфе 3.14, здесь рассмотрим вытеснение тока в пазах ротора при различных скольжениях.

При изменении скольжения частота в роторе $f_2 = f_1 s$ меняется в широких пределах. При $s = 1$ частота в роторе равна частоте сети. Так как стержни короткозамкнутой обмотки ротора окружены сталью, ток ротора вытесняется к воздушному зазору.

На рис. 3.56 показано вытеснение тока в пазу двигателя с глубокими пазами. Чтобы найти распределение тока в пазу при вытеснении тока, разобьем стержень по высоте на n слоев (рис. 3.56, а). Индуктивное сопротивление слоев стержня различное, так как поток пазового рассеяния $\Phi_{\sigma n}$ распределяется по высоте паза неравномерно и индуктивное сопротивление слоев, лежащих на дне паза, больше, чем ин-

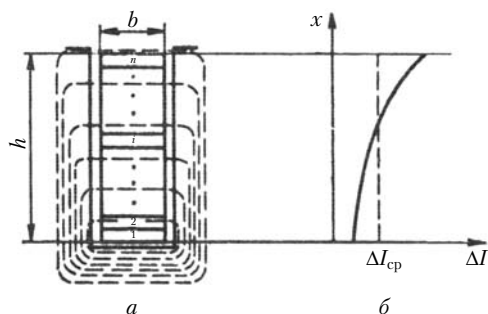


Рис. 3.56. К определению вытеснения тока в глубоком пазу

дуктивное сопротивление слоя, расположенного ближе к зазору: $x_{1\text{сп}} > x_{n\text{сп}}$. При этом магнитная проницаемость стали считается равной ∞ . Из-за различия сопротивлений токовых слоев плотность тока ΔI по высоте распределяется неравномерно (рис. 3.56, б). На этом рисунке $\Delta I_{\text{ср}}$ — распределение плотности тока при $s = 0$. Неравномерное распределение тока приводит к увеличению потерь в роторе, что можно представить эквивалентным увеличением активного сопротивления обмотки за счет эффекта вытеснения тока. Индуктивное сопротивление за счет эффекта вытеснения тока уменьшается.

Задачу о вытеснении тока в пазу впервые рассмотрел Ф. Эмде. Вытеснение тока происходит в участках обмотки ротора, окруженных сталью, поэтому активное сопротивление обмотки ротора

$$r'_2 = k_r r'_{2\text{п}} + r'_{2\text{л}}, \quad (3.106)$$

а индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора

$$x'_2 = k_x x'_{2\text{п}} + x'_{2\text{л}}, \quad (3.107)$$

где $r'_{2\text{п}}$ и $x'_{2\text{п}}$ — активное и индуктивное сопротивления пазовой части обмотки при равномерном распределении тока ($f_2 = 0$); $r'_{2\text{л}}$, $x'_{2\text{л}}$ — сопротивления лобовых частей обмотки; k_r и k_x — коэффициенты, учитывающие изменение сопротивлений из-за вытеснения тока;

$$k_r = \xi \frac{\text{sh } 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (3.108)$$

$$k_x = \frac{3\text{sh } 2\xi - \sin 2\xi}{2\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}, \quad (3.109)$$

здесь

$$\xi = \frac{h}{h_{\text{пр}}}, \quad (3.110)$$

где h — высота стержня (см. рис. 3.56); $h_{\text{пр}}$ — эквивалентная глубина проникновения тока при поверхностном эффекте:

$$h_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_a} \gamma \omega}, \quad (3.111)$$

здесь γ — удельная проводимость; магнитная проницаемость для всех материалов, кроме ферромагнитных, $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\omega = 2\pi f_1 s$.

Глубина проникновения зависит от материала обмотки и частоты тока. Чем выше частота, тем больше сказывается эффект вытеснения тока. В обмотках с большим удельным сопротивлением эффект вытеснения сказывается слабее.

Для медных стержней при 50°C $\rho = 1/\gamma = 0,02 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, при $b = b_{\text{п}}$ (короткозамкнутые обмотки не имеют изоляции) для частоты 50 Гц

$$\xi = 2\pi \cdot 10^{-3} \frac{h}{100} \sqrt{\frac{50s}{10 \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}}},$$

или приближенно

$$\xi = h\sqrt{s}. \quad (3.112)$$

Для медных стержней при $f = 50$ Гц и $s = 1$ $\xi \approx h$, а для алюминиевого стержня, считая, что ρ алюминия примерно в 2 раза больше ρ меди, имеем $\xi \approx 0,7h\sqrt{s}$.

Зависимость k_r и k_x от ξ представлена на рис. 3.57. В рабочем диапазоне ($\xi = 1 \div 4$) k_r и k_x можно аппроксимировать и считать $k_r \approx \xi$, а $k_x \approx \sqrt[3]{2}\xi$. Эти зависимости на рис. 3.57 показаны штриховой линией.

У медных стержней вытеснение тока сказывается при $h > 1$ см, а у алюминиевых — при $h > 1,4$ см.

В двигателях с глубокими пазами при высоте стержня 5 см $k_r \approx 5$, а k_x в 3,33 раза меньше, чем в рабочем режиме.

Значительное изменение сопротивлений обмотки ротора искажает диаграмму тока, которая для асинхронного двигателя с глубокими пазами показана на рис. 3.58. В настоящее время статические и динамические характеристики двигателей с глубоким пазом рассчитываются с помощью ЭВМ.

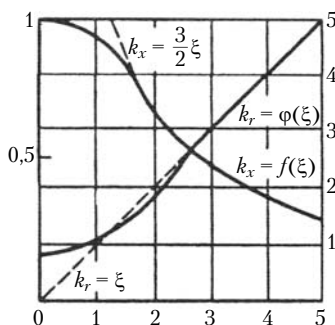


Рис. 3.57. Зависимость k_r и k_x от ξ

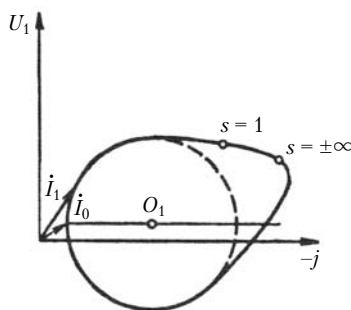


Рис. 3.58. Геометрическое место токов асинхронной машины с глубоким пазом

У машин с глубоким пазом кратность пускового момента выше, а кратность пускового тока меньше, чем у асинхронных машин общего назначения:

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}}} = 1 \div 1,4;$$

$$k_i = \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{НОМ}}} = 4,5 \div 6,0.$$

Разбивая стержень по высоте на n слоев, можно определить вытеснение тока для любой формы паза.

Несмотря на благоприятные характеристики машин с глубоким пазом, они выпускаются в ограниченном объеме, так как применение глубоких пазов приводит к увеличению диаметра ротора и габаритов машины.

В серии 4А выпускается модификация двигателей с повышенным моментом, имеющих ротор с двойной беличьей клеткой с отношением площадей пусковой и рабочей обмоток в пределах 0,2—0,6.

Помимо двигателей с глубокими пазами широко применяются обмотки с пазами колбообразного, бутылочного и трапецидального профилей.

На рис. 3.59 представлены механические характеристики асинхронных двигателей с пазами различной формы. Кривая 1 — механическая характеристика двигателя с круглыми пазами. Зону между кривыми 2 и 3 $M = f(s)$ занимают двигатели с глубокими пазами и трапецидальными, причем двигатели с трапецидальными пазами имеют механическую характеристику, близкую к кривой 3. Зону между

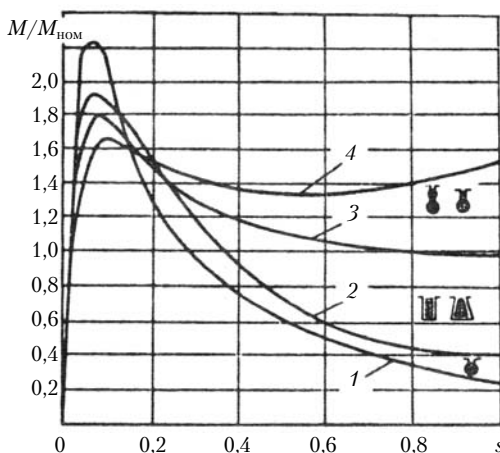


Рис. 3.59. Механические характеристики двигателей для различной формы пазов в роторе

механическими характеристиками 3 и 4 занимают двигатели с двойной беличьей клеткой и двигатели с пазами колбообразного профиля. При этом характеристика 4 относится к двигателям со стержнями колбообразного профиля.

Вследствие увеличения индуктивного сопротивления рассеяния максимальный момент у двигателей с фасонными пазами меньше на 15–20% по сравнению с двигателем, имеющим круглые пазы, а $\cos \varphi$ снижается на 4–6%.

В обмотках роторов асинхронных машин явление вытеснения тока используется для получения положительного технического эффекта — улучшения пусковых характеристик при сохранении высоких энергетических показателей в номинальном режиме. Явление вытеснения тока проявляется себя и в обмотках статора. Чтобы уменьшить его, как и в трансформаторах, параллельные проводники делают с отношением h/b , близким к единице, а в машинах большой мощности выполняют и транспозицию.

При исследовании характеристик асинхронных машин следует учитывать не только вытеснение тока, но и наличие вихревых токов, а также насыщение.

Чтобы получить лучшие технико-экономические показатели, все асинхронные двигатели выполняются насыщенными: номинальное напряжение находится на колене кривой намагничивания $B(H)$ (рис. 3.60).

Насыщение магнитной системы машины сказывается на значении взаимной индуктивности M , которая входит в уравнения напряжений машины (3.3). Нелинейное изменение $M = f(I_0)$ вызывает появление высших гармоник в воздушном зазоре и влияет на статические и динамические характеристики машины, а также является дополнительным источником вибраций и шума машины.

Так как намагничивающий ток является функцией времени, то и взаимная индуктивность является функцией времени, поэтому

$$L(t) = M(t) + L_{\sigma}(t). \quad (3.113)$$

Полная индуктивность обмотки, взаимная индуктивность и рассеяние от времени пуска могут изменяться по различным законам. Чтобы учесть изменение L , M , L_{σ} и определить их влияние на статические и динамические характеристики, надо знать изменение их от времени и, подставив в уравнения электромеханического преобразования энергии, решить уравнения (3.3) и (3.4) с помощью ЭВМ. Непостоянство параметров, их нелинейная зависимость от времени усложняют решение уравнений, увеличивают время решения, но принципиально не изменяют вид уравнений. Как правило, при составлении программ на ЭВМ учитывается нелинейность изменения параметров, и в частном случае уравнения решаются при постоянных параметрах.

В машинах общего назначения поток рассеяния составляет 3–8% основного потока и замыкается по воздуху. Поэтому индуктивности рассеяния статорных и роторных обмоток можно считать не зависящими от насыщения. Далее можно принять допущение, что L и M от времени изменяются по одному и тому же закону. Это дает возможность значительно упростить решение уравнений.

При рассмотрении уравнений многообмоточных машин в параграфе 3.12 было отмечено, что механические характеристики многообмоточных машин с любым числом обмоток располагаются в зоне идеальной характеристики с малым активным сопротивлением и механической характеристикой

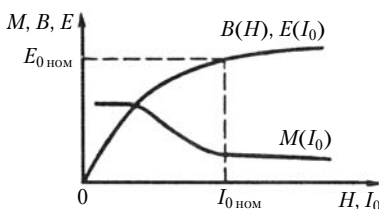


Рис. 3.60. Характеристика намагничивания и взаимной индуктивности от насыщения асинхронной машины

массивного ротора. Изменяя форму пазов, нелинейные зависимости параметров обмотки ротора и число обмоток, можно получить любую механическую характеристику, находящуюся в зоне между характеристиками M_{11} и M_{12} (см. рис. 3.52).

В насыщенной машине все гармоники связаны между собой, гармонический спектр полей в зазоре изменяется в зависимости от нагрузки, напряжения и частоты. В воздушном зазоре асинхронной машины появляются гармоники, связанные с насыщением, и возникают связи между ними. Однако уравнения насыщенной машины можно свести к уравнениям m , n -обмоточной машины.

Уравнения обобщенного ЭП m , n -обмоточной машины являются наиболее общими уравнениями в электромеханике и описывают процессы преобразования энергии в многообмоточных машинах с учетом нелинейностей и спектров гармоник магнитного поля в воздушном зазоре [7].

3.14. Переходные процессы в асинхронных машинах

Переходные процессы имеют место при изменении нагрузки на валу, напряжения, частоты сети, направления вращения при включении и отключении машины от сети, при изменении параметров асинхронной машины. Переходные процессы описываются дифференциальными уравнениями асинхронной машины (3.3) и (3.4) или их видоизменениями. Установившиеся процессы являются частным случаем переходных процессов. Во многих устройствах асинхронные машины непрерывно работают в переходных режимах, и умение проектировать их с учетом переходных процессов определяет их массу и другие технико-экономические показатели. К таким устройствам относятся приводы с ударной нагрузкой (дробилки, электрохолодильники и т.п.), крановые приводы и т.д.

Наиболее важными переходными процессами являются процессы пуска в ход, торможения, реверса, повторного включения и изменения нагрузки на валу. Чтобы исследовать эти процессы, необходимо на ЭВМ решить уравнения (3.3) и (3.4) при тех или иных значениях параметров питающего напряжения и частоты [7].

На рис. 3.61 и 3.62 приведены осциллограммы пуска двигателя 4А100S4УЗ ($P_2 = 3$ кВт, $n_c = 1500$ об/мин). Осциллограммы получены при моделировании уравнений (3.3), (3.4) на ЭВМ. Как очевидно из рисунков, в начале переходного

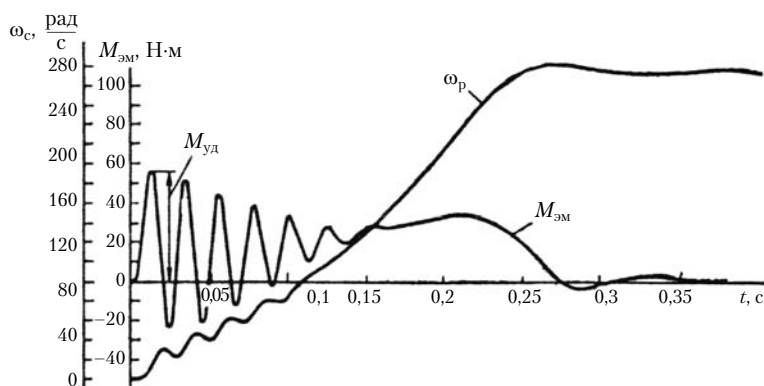


Рис. 3.61. Пуск асинхронного двигателя 4A100S4У3 при $M_c = 0$ и синусоидальном напряжении питания

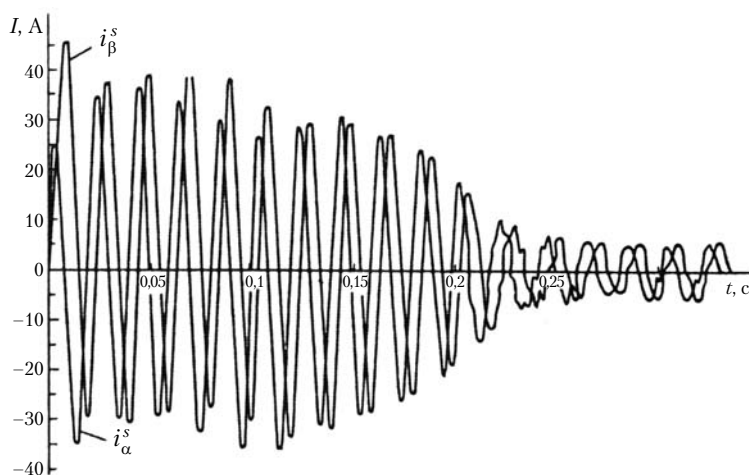


Рис. 3.62. Изменение токов в статоре при пуске

процесса броски токов максимальны. В первый полупериод наступает максимальный бросок моментов — так называемый ударный момент $M_{уд}$. На колебания токов и момента отвечает и частота вращения ротора. В конце переходного процесса колебания токов и момента затухают, а частота ротора и электромагнитный момент плавно достигают установившихся значений.

Переходные процессы во вращающихся электрических машинах определяются электромагнитными процессами, связанными с созданием полей в машине, и механическими

процессами, обусловленными изменением частоты вращения ротора. Длительность электромагнитных процессов определяется электромагнитной постоянной времени $T_{эм}$. Электромеханические процессы определяются в основном моментом инерции ротора и характеризуются электромеханической постоянной времени T_m .

Переходные процессы в асинхронном двигателе можно разделить на три стадии.

В первой, начальной стадии, продолжающейся несколько периодов, в пределах T_m из сети забирается в основном активная мощность, которая идет на создание магнитного поля машины и разгон ротора — запасание кинетической энергии во вращающихся частях и совершение механической работы. Эта стадия характеризуется большими пиками токов и момента и значительными ускорениями ротора (см. рис. 3.61 и 3.62).

Во второй стадии, когда процессы, определяемые $T_{эм}$, установились, а разбег ротора еще продолжается, энергия, потребляемая из сети, расходуется на увеличение кинетической энергии и совершение механической работы. В этой стадии машина обменивается мощностью с сетью и соотношение между активной и реактивной мощностями все более стабилизируется, approaching к значениям установившегося режима. Амплитуды токов и момента затухают.

В конечной, третьей стадии переходного процесса, когда ротор достигает установившейся частоты вращения, броски токов и моментов уменьшаются и машина входит в установившийся режим.

В асинхронных машинах традиционной конструкции $T_{эм}$ на порядок меньше T_m и в первом приближении можно рассматривать переходные процессы без учета электромагнитных процессов.

На характер протекания переходных процессов при пуске основное влияние оказывают момент инерции и активное сопротивление обмотки ротора. Двигатели небольшой мощности с малым моментом инерции разгоняются до установившейся скорости за несколько периодов, но ротор может выйти за синхронную частоту вращения и после качания у синхронной скорости перейти в установившийся режим. Двигатели большой мощности разгоняются медленно, и ротор подходит к установившейся частоте вращения без перегулирования.

Как показывают исследования, процессы при пуске определяются начальными значениями параметров при $s = 1$.

Характер нелинейного изменения параметров в процессе разгона имеет второстепенное значение.

Из-за насыщения индуктивные параметры отличаются от их значений при установившихся режимах. Индуктивности и взаимные индуктивности при пуске на 30—40% меньше их установившихся значений. Параметры машины в начальный момент времени переходного процесса называются переходными параметрами. Определить переходные параметры асинхронных машин можно с помощью ЭВМ, если известны результаты переходного процесса при пуске. Расчетные методики для определения переходных параметров асинхронных машин разработаны еще недостаточно, так как переходными процессами в асинхронных машинах глубоко начали заниматься с появлением ЭВМ.

При пуске асинхронных двигателей для увеличения пускового момента необходимо увеличивать r_2 , а при номинальном режиме для увеличения КПД и $\cos \varphi$ надо r_2' иметь меньше, чтобы $s_{\text{ном}}$ было равно 1—4%.

Для тяжелых условий пуска в приводах от нескольких киловатт до сотен киловатт применяются двигатели с фазным ротором. В этих двигателях фазная обмотка выводится на кольца, к которым при пуске подключается резистор. По мере разгона двигателя сопротивление резистора постепенно уменьшается, а затем резистор выводится и кольца закорачиваются.

Пусковые резисторы выполняют проволочными, литыми чугунными и жидкостными. Резисторы помещают в бак с трансформаторным маслом и рассчитывают на кратковременный режим работы. Жидкостный резистор представляет собой сосуд с электролитом, в который опущены электроды. При изменении глубины погружения электродов изменяется сопротивление резистора.

На рис. 3.63 показан процесс пуска двигателя с фазным ротором. Двигатель пускается с полностью введенным резистором и работает на механической характеристике 1. При этом $M_{\text{п}} \approx M_{\text{max}}$. После того как двигатель подойдет к скольжению

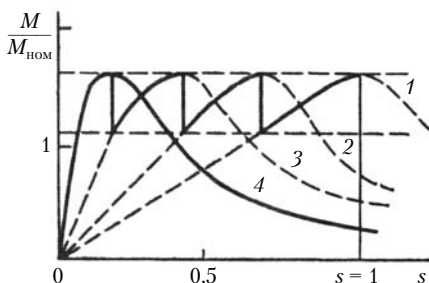


Рис. 3.63. Пуск в ход двигателя с фазным ротором

$s \approx 0,5 \div 0,6$, переключается резистор и закорачивается часть его сопротивления. Двигатель переходит на характеристику 2. Затем при $s \approx 0,3 \div 0,4$ переключается вторая ступень и двигатель начинает работать на характеристике 3. После того как будет закорочена третья ступень при $s \approx 0,1 \div 0,2$, двигатель переходит на естественную механическую характеристику 4.

После окончания пуска щетки закорачиваются, а пусковой резистор приводится в исходное положение. В некоторых старых конструкциях после закорачивания фазных обмоток щетки поднимались. В современных конструкциях щетки скользят по кольцам во всех режимах работы. Это приводит к увеличению механических потерь, но повышает надежность двигателя за счет упрощения щеточного аппарата.

Двигатели с фазным ротором дороже двигателей с короткозамкнутой обмоткой и требуют дополнительной пускорегулирующей аппаратуры. В серии 4А двигатели с фазным ротором выполняются на мощности от 5,5 до 400 кВт и частоты вращения от 500 до 1500 об/мин. В двигателях с высотой оси вращения 160–200 мм применена всыпная обмотка, а в двигателях с высотой оси вращения 225–355 мм — стержневая из медной проволоки прямоугольного сечения.

Электротехническая промышленность для тяжелых условий пуска изготавливает двигатели с короткозамкнутым ротором — это двигатели с двойной беличьей клеткой и двигатели с глубоким пазом специального профиля (см. параграф 3.13). В этих двигателях из-за вытеснения тока ток в стержнях обмотки ротора проходит при пуске по части обмотки, расположенной ближе к зазору, а при номинальном режиме распределяется равномерно по всему сечению обмотки.

В двигателях с двойной беличьей клеткой пусковая клетка, находящаяся ближе к зазору, выполняется меньшего сечения, чем рабочая (см. рис. 3.50). Иногда пусковую клетку выполняют из латуни или бронзы, а рабочую — из меди. Механическая характеристика двигателя с двойной беличьей клеткой показана на рис. 3.59.

Рассчитывая асинхронный двигатель, необходимо стремиться к увеличению пускового момента, оставляя кратность пускового тока не более $k_i = 5 \div 7$. Увеличение токов в переходных режимах приводит к увеличению ударных моментов, а также к увеличению падения напряжения в се-

ти, что неблагоприятно сказывается на пусковых характеристиках, так как момент пропорционален квадрату напряжения.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором пускают обычно прямым включением на номинальное напряжение. Процесс пуска определяется механическими характеристиками двигателя и нагрузки (см. рис. 3.53). Чтобы двигатель мог разогнаться до номинальной частоты вращения, необходимо, чтобы $M_{\text{п}}$ был больше $M_{\text{с}}$ при $s = 1$ и механические характеристики двигателя и нагрузки пересекались в одной точке вблизи $s_{\text{ном}}$. Если из-за провалов в кривой $M = f(s)$ она может пересекаться с кривой $M_{\text{с}} = f(s)$ вблизи скольжений $s = 1$, то двигатель «застрянет» в этой точке и из-за больших потерь в роторе не сможет длительно работать в таком режиме. В этом случае необходимо выбрать двигатель большей мощности.

Уравнение движения ротора двигателя

$$M_{\text{с}} + M_{\text{эм}} = J \frac{d\omega_{\text{р}}}{dt}. \quad (3.114)$$

Процесс разгона двигателя продолжается до тех пор, пока электромагнитный момент и момент сопротивления не окажутся равными по модулю. Для определения времени пуска в первом приближении можно проинтегрировать уравнение движения (3.114):

$$t_{\text{п}} = \int_0^{\omega_{\text{р, ном}}} \frac{J d\omega_{\text{р}}}{M_{\text{эм}} + M_{\text{с}}}. \quad (3.115)$$

Для более точного определения $t_{\text{п}}$ необходимо решить на ЭВМ уравнения напряжения и движения (3.3) и (3.4). При этом $t_{\text{п}}$ определяется с учетом электромагнитных переходных процессов. При определении $t_{\text{п}}$ из уравнения (3.115) переходные процессы в обмотках двигателя не учитываются.

При небольших различиях $M_{\text{эм}}$ и $M_{\text{с}}$ процесс пуска затягивается, что приводит к увеличению потерь в роторе, а это может вызвать недопустимое увеличение температуры обмоток. В некоторых случаях для крупных двигателей ограничивается число включений двигателя в 1 ч.

При пуске крупных асинхронных двигателей для ограничения пусковых токов включается реактор или автотрансформатор. При особо трудных условиях пуска двигателей в несколько десятков тысяч киловатт применяют

частотный пуск, когда с помощью преобразователя частоты постепенно повышается частота подводимого к статору напряжения. При частотном пуске одновременно регулируются частота и напряжение, подводимые к двигателю, так, чтобы выполнялось условие $\frac{U}{f} = \text{const}$. При таком регулировании поток в двигателе остается практически неизменным и броски тока не превышают двух-трехкратных значений по сравнению с номинальным током. Однако частотный пуск имеет ограниченные применения из-за больших габаритов и стоимости преобразователей, рассчитываемых на полную мощность двигателя, а работающих только при пуске.

Реакторный пуск осуществляется по схеме рис. 3.64, а. Пусковые реакторы имеют ферромагнитный магнитопровод. Их рассчитывают на кратковременный режим работы. Для двигателей большой мощности применяются бетонные реакторы.

Пусковой ток при включенном реакторе (выключатель Q2 разомкнут)

$$I_{\Pi} = \pm \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{r_{\text{к}}^2 + (x_{\text{к}} + x_{\text{р}})^2}}, \quad (3.116)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение двигателя; $x_{\text{р}}$ — индуктивное сопротивление реактора (активным сопротивлением реактора пренебрегаем). За счет $x_{\text{р}}$ пусковой ток уменьшается до трех-четыrehкратного значения.

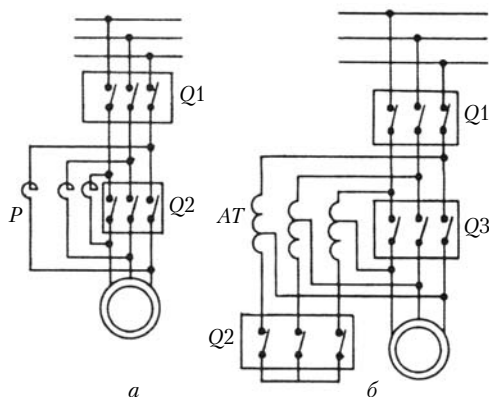


Рис. 3.64. Схемы пуска асинхронных двигателей большой мощности

Процесс пуска при включении реактора осуществляется следующим образом. При разомкнутом выключателе $Q2$ двигатель выключателем $Q1$ подключается к сети. После достижения ротором номинальной частоты вращения выключателем $Q2$ закорачивается реактор.

При автотрансформаторном пуске (рис. 3.64, б) сначала включаются выключатели $Q1$ и $Q2$ и на двигатель через автотрансформатор подается пониженное напряжение. После отключения $Q2$ автотрансформатор некоторое время работает как реактор, а по достижении двигателем номинальной частоты вращения включается выключатель $Q3$ и двигатель подключается к сети.

Переключением обмоток статора в конце пуска со звезды на треугольник также можно обеспечить снижение пусковых токов. При таком пуске линейные токи снижаются в 3 раза, а напряжения — в $\sqrt{3}$ раз. Недостатком этого способа пуска является размыкание цепи двигателя, что приводит к перенапряжениям. Данный способ пуска в настоящее время почти не применяется.

Для пуска в ход асинхронных двигателей большой мощности иногда применяется пуск с помощью разгонного двигателя, который жестко соединен с валом основного двигателя. Если основной двигатель тихоходный, то разгонный двигатель выбирается на частоту вращения на ступень бóльшую. При подходе к синхронной частоте вращения основного двигателя разгонный двигатель отключается, а основной двигатель подключается к сети. Недостаток этого способа — наличие разгонного двигателя, используемого только при пуске.

Одним из тяжелых переходных режимов является режим реверса, когда при переключении порядка следования фаз на выводах машины происходит изменение направления вращения ротора. При реверсе двигатель сначала отключается от сети, а затем включается на напряжение обратной последовательности. Переходный процесс определяется временем коммутации и в сильной степени — скоростью затухания магнитного поля в воздушном зазоре. Чем меньше время коммутации, тем больше ударные токи и моменты, тем тяжелее протекают переходные процессы.

При повторном включении асинхронного двигателя в сеть при наличии еще незатухшего поля в зазоре также наблюдаются большие ударные токи и моменты. Процесс повторного включения имеет место при кратковременных пе-

перывах питания, а также в тяговых асинхронных двигателях при нарушении скользящего контакта в сети.

Если питание прерывается на несколько секунд, большинство асинхронных двигателей успевает остановиться. При восстановлении напряжения начнется самозапуск асинхронных двигателей. Процесс этот является трудным и для двигателей, и для сети, так как требуются большая реактивная мощность для создания полей в двигателях и активная мощность для запуска двигателей. При этом часть двигателей может не запуститься, а часть из-за затяжного пуска может перегреться. При длительном перерыве питания (в несколько секунд или минут) необходимо двигатели отключать от сети и только ответственные электроприводы оставлять подключенными к сети.

Процессы при реверсе и повторном включении сложнее процессов пуска. Оптимальные параметры при пуске, реверсе и других динамических режимах отличаются друг от друга.

Все параметры в переходных процессах определяются путем решения системы уравнений электромеханического преобразования энергии. Уменьшение или увеличение только одного из параметров не может привести к оптимальным результатам. Существуют оптимальные соотношения между параметрами машины, когда интересующие исследователя показатели имеют экстремумы.

Процессы преобразования энергии в переходных режимах значительно сложнее процессов в установившихся режимах, поэтому сложившиеся представления об энергетических показателях установившихся режимов не могут быть перенесены на переходные процессы. Здесь имеет смысл говорить о средних за время переходного процесса энергетических показателях. Понятия об активной, реактивной и полной мощностях теряют смысл, если рассматривать их мгновенные значения. Представляется целесообразным рассматривать реактивную мощность как мощность, идущую на создание магнитных полей в машине. При этом реактивная мощность преобразуется в активную, и наоборот. Весь сложный процесс преобразования энергии в машине описывается уравнениями электромеханического преобразования энергии со всей точностью и многообразием, которые выбрал исследователь.

В первый момент подключения двигателя к сети мощность из сети только забирается, а затем начинается обмен

мощностями между машиной и сетью; при отключении машины от сети реактивная мощность, запасенная в магнитных полях, преобразуется в тепло. Особенно сложные процессы в динамике имеют место в несимметричных электрических машинах с учетом нелинейных коэффициентов и при нисусоидальном несимметричном напряжении питания.

Возможности вычислительной техники в настоящее время позволяют решить практически все встречающиеся в практике задачи, связанные с исследованием переходных процессов асинхронных машин. Подробно эти процессы изучаются в спецкурсе [7].

3.15. Регулирование частоты вращения

Асинхронные двигатели наиболее просты в изготовлении и наиболее дешевые, поэтому применение их в регулируемых электроприводах весьма перспективно. Однако до сих пор не найдено дешевой и экономичной системы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей, хотя известны десятки способов регулирования их частот вращения.

Если обратиться к формуле, связывающей угловую скорость ротора с синхронной угловой скоростью и скольжением,

$$\omega_p = \omega_c(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s), \quad (3.117)$$

то из нее следует, что есть всего три варианта регулирования скорости: путем изменения частоты сети f_1 , числа пар полюсов p и скольжения s .

Регулирование скорости путем переключения числа полюсов ступенчатое. При жестких механических характеристиках двигателя, когда скольжение изменяется в небольших пределах, регулирование скорости экономичное. Следует иметь в виду, что ступени частоты вращения при частоте 50 Гц и $p = 1$ и 2 соответственно 3000 и 1500 об/мин, а при $p = 5$ и 6 — 600 и 500 об/мин. При большем числе полюсов разница между синхронными частотами вращения уменьшается.

Для изменения числа полюсов на статоре в одни и те же пазы можно уложить две отдельные обмотки с разными числами полюсов. В зависимости от необходимой частоты вращения включается одна или другая обмотка. При этом

работают поочередно одна и другая обмотки, что снижает использование материалов. Поэтому желательно иметь одну обмотку и путем изменения схемы обмотки переключать число полюсов.

Двигатели с изменением числа пар полюсов называются многоскоростными. Промышленностью выпускаются двигатели на две, три и четыре скорости. Двухскоростные двигатели изготавливаются с одной обмоткой и переключением полюсов $p_2:p_1 = 2:1$. Трехскоростные двигатели имеют две обмотки, причем одну — с переключением $p_2:p_1 = 2:1$. Четырехскоростные двигатели имеют две обмотки с переключением $p_2:p_1 = 2:1$. Многоскоростные двигатели выполняются с короткозамкнутым ротором, поэтому переключение числа пар полюсов производится только на статоре.

Возможность переключения числа пар полюсов путем изменения схемы обмотки иллюстрирует рис. 3.65. При соединении секций обмотки, как показано на рис. 3.65, а, получают четыре полюса, а по схеме рис. 3.65, б — два. Такие переключения производят в трех фазах, а переключаемые части обмоток могут соединяться параллельно или последовательно. При переключении числа полюсов полюсное деление изменяется в 2 раза, при этом изменяется и электрический угол фазной зоны — с 60° на 120° . Чтобы направление вращения поля при переключении числа полюсов оставалось неизменным, необходимо изменить порядок следования

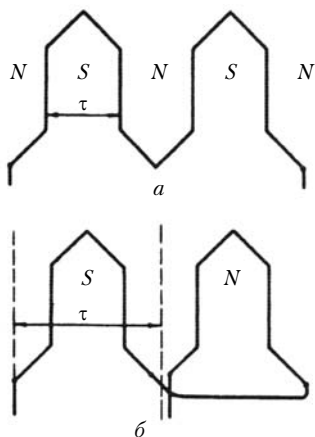


Рис. 3.65. Переключение числа полюсов при различном соединении секций

фаз путем переключения обмоток. На рис. 3.66 дана схема включения обмоток статора по схеме звезды, а на рис. 3.67 показано переключение обмоток статора на схему двойной звезды. При переключении по схеме рис. 3.67 со звезды на двойную звезду частота вращения изменяется в 2 раза, а момент остается одним и тем же.

Схемы рис. 3.68 при переключении чисел полюсов $\Delta/Y/Y$ обеспечивают регулирование при постоянной мощности, т.е. при увеличении скорости в 2 раза момент снижается в 2 раза.

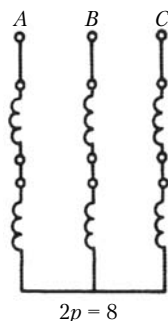


Рис. 3.66. Включение обмоток по схеме звезды

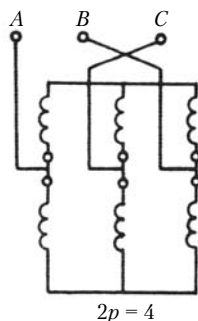


Рис. 3.67. Включение обмоток по схеме двойной звезды

При выборе числа полюсов в схеме с двумя обмотками необходимо обеспечить отсутствие наводок напряжения в отключенной обмотке. Для этого шаг одной обмотки выполняют равным половине шага второй обмотки, т.е. числа полюсов различаются в 2 раза.

При проектировании многоскоростных двигателей стремятся сохранить высокие энергетические показатели на всех синхронных частотах вращения. Поэтому многоскоростные двигатели получают с несколько большим расходом активных материалов на единицу мощности по сравнению с обычными асинхронными двигателями.

Несмотря на то что многоскоростные двигатели требуют сложной коммутационной аппаратуры и имеют несколько худшие энергетические показатели, они достаточно широко применяются в промышленности для приводов станков, лифтов, вентиляторов и насосов, т.е. там, где допустимо ступенчатое регулирование частоты вращения.

В серии 4А предусмотрен выпуск многоскоростных двигателей на базе односкоростных с использованием сердечников статора и ротора базовых машин на мощность 0,12—50 кВт на две, три и четыре синхронные частоты вращения.

Наиболее простым способом, обеспечивающим плав-

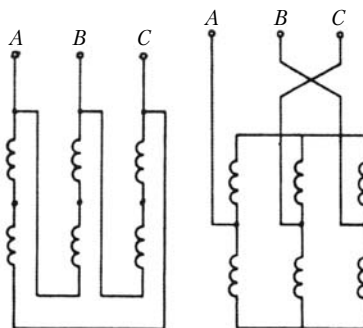


Рис. 3.68. Переключение обмоток с треугольника на двойную звезду

ное регулирование частоты вращения асинхронных двигателей, является изменение скольжения (см. формулу (3.117)). Принципиальным недостатком этого способа регулирования частоты вращения является низкий КПД, так как потери в роторе пропорциональны скольжению. И какие бы ни предлагались варианты схем изменения скольжения, а их существуют десятки, в электромеханическом преобразователе энергии преобразование в тепло и в механическую мощность имеет равные возможности. В асинхронных двигателях это проявляется особенно наглядно ($P_{\text{з2}} = P_{\text{эм}} s$). Эта связь не зависит от способа изменения скольжения, когда в процессе регулирования участвует одна машина.

Изменять скольжение асинхронного двигателя можно многими способами. Наиболее распространенные — это изменение напряжения, введение сопротивления в цепь ротора, искажение симметрии подводимых напряжений и введение ЭДС в цепь ротора.

При изменении напряжения, подводимого к статору машины, механические характеристики изменяются так, как показано на рис. 3.69. При изменении напряжения максимальный момент изменяется пропорционально квадрату напряжения, а критическое скольжение остается неизменным. При уменьшении U_1 изменяется точка устойчивой работы системы двигатель — нагрузка и изменяется скольжение от s_1 до s_2 . Как следует из рис. 3.69, пределы регулирования зависят от вида механических характеристик двигателя и нагрузки.

Чтобы расширить пределы регулирования — отношение максимальной частоты вращения к минимальной ($n_{\text{max}} : n_{\text{min}}$), надо иметь мягкую механическую характеристику двигателя, когда критическое скольжение двигателя находится в пределах $1 \div 3$. Двигатели с большим критическим скольжением, работающие в системах автоматического управле-

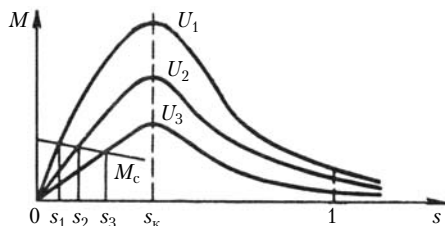


Рис. 3.69. Регулирование частоты вращения путем изменения напряжения

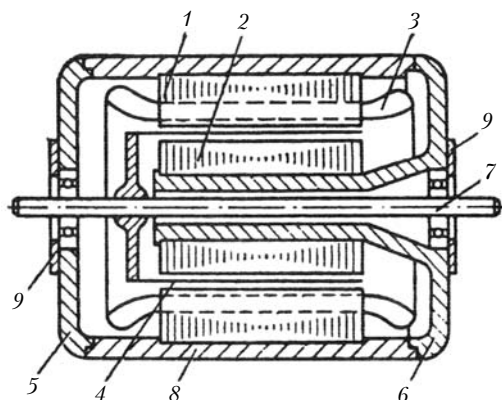


Рис. 3.70. Двигатель с полым ротором:

1 — статор; 2 — внутренний статор; 3 — обмотка статора; 4 — полый ротор; 5 — подшипниковый щит; 6 — подшипниковый щит с втулкой для внутреннего статора; 7 — вал; 8 — корпус; 9 — крышка подшипника

ния, называются исполнительными. К ним относятся асинхронные двигатели с массивным ротором и двигатели с полым ротором (рис. 3.70).

В исполнительных асинхронных двигателях важно иметь большое быстродействие и большую кратность пускового и максимального моментов. В двигателе с полым ротором ротор выполняется в виде тонкостенного стакана из алюминия. Ротор имеет небольшой момент инерции. Малый момент инерции, большое критическое сопротивление обеспечивают большое быстродействие и линейность механических характеристик в широком диапазоне изменения частоты вращения. Двигатели с полым ротором широко используются в системах автоматического управления и выпускаются промышленностью до мощности 30 Вт. Недостатком двигателей с полым ротором является наличие большого воздушного зазора, включающего в себя два механических зазора и толщину немагнитного ротора. Большой воздушный зазор снижает $\cos \phi$, а это приводит к снижению КПД.

Основной проблемой при создании силовых исполнительных двигателей на мощности в сотни ватт и выше является отвод тепла. При использовании исполнительного двигателя как моментного, работающего длительно при $s \approx 1$, практически вся мощность преобразуется в тепло. Для отвода тепла приходится увеличивать габариты двигателя,

чтобы снизить электромагнитные нагрузки и увеличить поверхность охлаждения. Применяются также вентиляторы-наездники, встраиваемые в двигатель, системы водяного и испарительного охлаждения. В исполнительном двигателе с вентилятором-наездником вентилятор вращается специальным асинхронным двигателем, частота вращения которого не зависит от частоты вращения исполнительного двигателя.

Изменять частоту вращения асинхронного двигателя можно, вводя активное сопротивление в цепь ротора (рис. 3.71). В двигателе с фазным ротором регулировочный резистор подключается к кольцам, и при изменении активного сопротивления резистора двигатель плавно или ступенями, в зависимости от конструкции резистора, переходит с одной механической характеристики на другую.

Преимущество регулирования частоты вращения путем изменения активного сопротивления ротора в том, что максимальный момент остается неизменным, так как не изменяется напряжение, подводимое к двигателю. Включение резистора в обмотку ротора приводит к тому, что частично потери в роторе выделяются в резисторе. При этом отношение потерь, выделяемых в роторе и в резисторе, пропорционально отношению активных сопротивлений обмотки ротора и резистора. Выведение потерь из машины дает возможность уменьшить габариты машины.

При регулировании частоты вращения асинхронных исполнительных двигателей находит применение комбинированный способ регулирования, когда изменяются подводимое к двигателю напряжение и активное сопротивление ротора.

При изменении частоты вращения изменяется частота в роторе $f_2 = f_1 s$. За счет вытеснения тока при изменении f_2

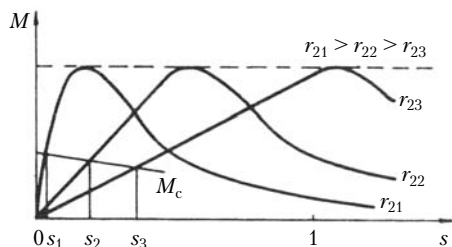


Рис. 3.71. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя путем изменения активного сопротивления ротора

можно получить необходимый закон изменения r_2 . Для этого на стальной ферромагнитный диск укладывается трехфазная обмотка, соединенная с фазной обмоткой ротора. При увеличении частоты f_2 растет активное сопротивление короткозамкнутой обмотки, выполненной в виде диска, и частота вращения изменяется за счет напряжения и активного сопротивления обмотки ротора.

Преимущество такого исполнительного двигателя — отсутствие скользящих контактов и лучшие условия охлаждения вращающегося диска. Такой двигатель имеет и ряд крупных недостатков: большой момент инерции, технологические трудности в намотке обмотки на диски и тяжелые тепловые режимы работы обмотки, намотанной на стальной диск, в котором в основном выделяются потери скольжения. Изменение активного сопротивления стального диска с обмоткой, в которой протекают трехфазные токи, используется и в пусковых резисторах для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором.

Регулирование напряжения на выводах двигателя осуществляется путем включения реакторов насыщения, магнитных усилителей, автотрансформаторов и тиристорных преобразователей напряжения. Последние в настоящее время получили наибольшее распространение.

Тиристорные преобразователи напряжения включают последовательно в обмотку статора двигателя (рис. 3.72). Через преобразователь проходит вся мощность двигателя, и габариты преобразователя несмотря на применение тиристоров в 1,5–2,5 раза больше габаритов двигателя.

Магнитные усилители в качестве регуляторов применяют реже, так как они имеют достаточно большие габариты. На рис. 3.73 показана реверсивная схема с применением магнитных усилителей. Асинхронный исполнительный двигатель включен в плечи моста. При насыщении магнитных усилителей МУ1 и МУ3 асинхронный двигатель вращается в одну сторону, а при насыщении магнитных усилителей МУ2, МУ4 — в другую, так как при

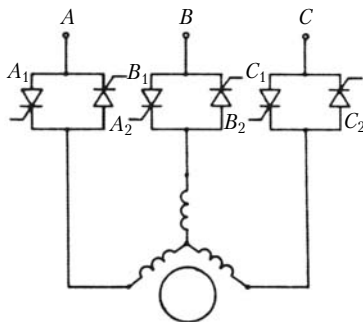


Рис. 3.72. Схема регулирования частоты вращения с тиристорным регулятором напряжения

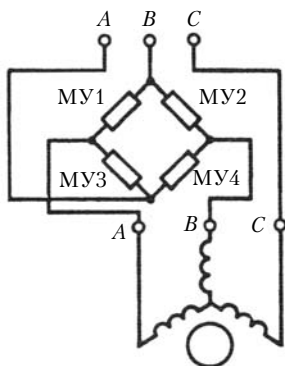


Рис. 3.73. Реверсивная схема регулирования частоты вращения асинхронных двигателей:

МУ1 – МУ4 – магнитные усилители

На рис. 3.74 представлена схема электромеханического каскада. В асинхронном двигателе с фазным ротором АД в обмотку ротора включен выпрямитель и мощность скольжения после преобразователя поступает на якорь двигателя постоянного тока ДПТ. Якорь двигателя постоянного тока жестко соединен с валом асинхронного двигателя, и к моменту, развиваемому асинхронным двигателем, $M_{АД}$ добавляется момент двигателя постоянного тока $M_{ДПТ}$. Таким образом, мощность скольжения в каскаде используется для создания дополнительного момента.

В электрическом каскаде (рис. 3.75) мощность скольжения асинхронного двигателя АД после преобразователя сно-

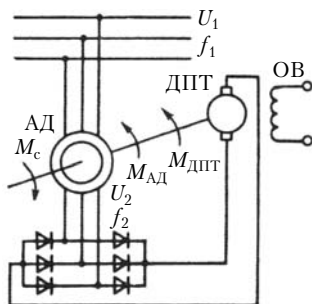


Рис. 3.74. Электро-механический каскад

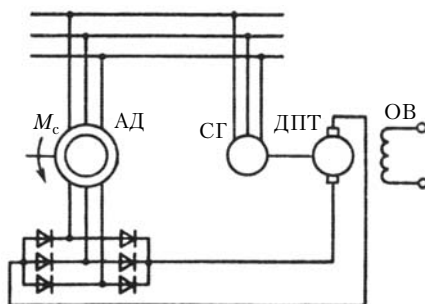


Рис. 3.75. Электрический каскад

этом изменяется фаза напряжения на обмотках двигателя.

Проблема регулирования частоты вращения асинхронных двигателей оригинально решена в двигателях-усилителях, в которых магнитные усилители выполнены на спинке статора с намоткой обмоток магнитного усилителя в те же пазы, что и двигателя.

Мощность скольжения $P_{эм} s$ может быть использована или частично возвращена в сеть, если использовать дополнительно другие электрические машины или статические преобразователи частоты. Такие схемы регулирования называются каскадными.

ва подается на двигатель постоянного тока ДПТ, на валу которого находится синхронный генератор СГ. Синхронный генератор отдает электрическую энергию в сеть. В этой схеме мощность скольжения отдается в сеть.

Недостатком обеих схем является наличие машины постоянного тока и силовых выпрямителей. Габариты выпрямителей и двигателя постоянного тока зависят от пределов регулирования.

Рассмотренные каскадные схемы с машиной постоянного тока не являются единственными. В каскадах применяются коллекторные двигатели переменного тока, одноякорные преобразователи и другие машины. Более подробно каскадные схемы анализируются в гл. 7.

Интересной схемой регулирования частоты вращения асинхронного двигателя является двигатель с поворотным статором (рис. 3.76). Этот двигатель имеет общий ротор и два статора, один из которых может поворачиваться относительно другого. Когда электрические оси двух статоров совпадают, в обмотке ротора наводятся ЭДС, действующие согласно, и мощность, развиваемая агрегатом, равна удвоенной мощности одной машины.

Короткозамкнутый ротор двигателя имеет среднее короткозамыкающее кольцо с большим сопротивлением 1 и два крайних кольца с небольшим активным сопротивлением 2. При повороте одного статора относительно другого смещаются потоки и ЭДС в обмотке статора. Токи ротора начинают замыкаться по кольцу 1 с повышенным активным сопротивлением. Путем изменения угла между статорами достигается регулирование частоты вращения. При этом механические характеристики получаются близкими к характеристикам, получаемым при изменении напряжения и активного сопротивления ротора. Этот двигатель предложен П. Бушеров в 1899 г.

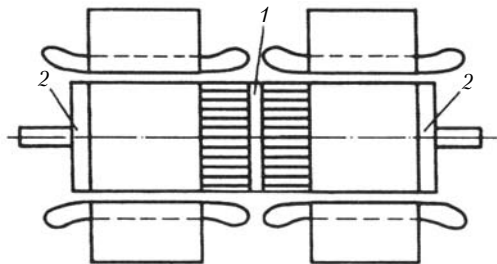


Рис. 3.76. Двигатель с поворотным статором

Видоизменением двигателя Бушера является машина, в которой поворот оси поля одной машины относительно другой осуществляется путем переключения секций обмоток каждой фазы. Поворот оси поля одной из обмоток можно осуществить также при помощи индукционного регулятора.

Рассмотренные схемы регулирования частоты вращения путем изменения скольжения далеко не исчерпывают имеющихся предложений.

Наиболее перспективным способом регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является частотный. Изменение частоты, подводимой к двигателю, осуществляется преобразователем частоты ПЧ (рис. 3.77). При частотном регулировании изменяется синхронная частота вращения, а двигатель работает с небольшим скольжением. Регулирование экономичное, однако через преобразователь частоты проходит вся мощность, и габариты преобразователя частоты превышают габариты двигателя. При преобразовании частоты и напряжения сети преобразователь частоты изменяет напряжение и частоту на выходе по закону $\frac{U}{f} = \text{const}$, что обеспечивает работу асинхронного двигателя при постоянном магнитном потоке.

Регулировать частоту можно и в статоре, и в роторе. В двигателях большой мощности удобнее регулировать частоту в роторе, так как при небольших пределах регулирования частоты вращения мощность скольжения $P_{\text{эм}} s$ значительно меньше мощности обмотки статора. Поэтому преобразователь частоты имеет меньшие габариты. В этом случае мощность в воздушный зазор поступает со стороны статора и ротора. Такие машины получили название асинхронных двигателей двойного питания, а способ регулирования частоты вращения называют введением ЭДС в цепь ротора. Этот способ занимает среднее положение между частотным способом и способом изменения скольжения.

Несмотря на применение тиристоров, частотный привод все еще не занял доминирующего положения в регулируемых приводах с асинхронными двигателями. В последнее



Рис. 3.77. Схема частотного регулирования частоты вращения асинхронных двигателей

время в связи с появлением силовых транзисторов при параллельном их соединении появилась возможность создать дешевый малогабаритный преобразователь частоты на мощность в несколько киловатт. Следует иметь в виду, что введение в энергосистему большого количества нелинейных элементов приводит к появлению высших гармоник в сети и искажению синусоидальности напряжений. Ухудшение качества электроэнергии приводит к потерям в энергосистеме. Затраты на повышение качества электроэнергии следует относить к стоимости силовых электроприводов с нелинейными элементами.

3.16. Работа асинхронного двигателя при несинусоидальном несимметричном напряжении питания

Форма напряжения в энергосистеме почти не отличается от синусоиды. Но в отдельных районах из-за наличия большого числа выпрямительных установок и других нелинейных нагрузок напряжение сети содержит высшие гармоники. В автономных электромеханических системах при питании асинхронных двигателей от статических преобразователей частоты или тиристорных преобразователей напряжения выходное напряжение сильно отличается от синусоиды и содержит значительное число высших гармоник с достаточно большими амплитудами. Поэтому исследование процессов преобразования энергии в асинхронных машинах при несинусоидальном напряжении питания имеет важное значение. Уравнения, описывающие процессы преобразования энергии при синусоидальном напряжении, являются частным случаем уравнений, описывающих процессы при несинусоидальном напряжении.

Рассматривая идеальную асинхронную машину, можно считать, что при несинусоидальном напряжении на ее выводах в воздушном зазоре будут только временные гармоники, происхождение которых связано с несинусоидальностью питающего напряжения. В идеальной двухфазной машине форма поля в воздушном зазоре повторяет форму фазного напряжения. Зная форму напряжения, можно разложить кривую напряжения в гармонический ряд и определить амплитуды и фазы высших гармоник поля в воздушном зазоре.

При прямоугольном напряжении питания высшие гармоники имеют максимальные амплитуды. Третья гармони-

ка имеет амплитуду, равную $1/3$ 1-й, 5-я — $1/5$, а v -я — $1/v$. Четные гармоники появляются в воздушном зазоре при наличии постоянной составляющей в фазных напряжениях. По мере отклонения напряжений от прямоугольной формы амплитуды высших гармоник уменьшаются, а при синусоидальном напряжении в воздушном зазоре остается одна гармоника.

Зная форму поля в воздушном зазоре и обращаясь к модели обобщенного электромеханического преобразователя, можно составить уравнения асинхронной машины при несинусоидальном напряжении питания.

Каждая гармоника в воздушном зазоре в математической модели создается парой обмоток на статоре или роторе, если к обмоткам подвести напряжения соответствующих частоты и амплитуды. Имея m пар обмоток на статоре и роторе и подводя к ним синусоидальные напряжения соответствующих амплитуд и частот, можно сформировать несинусоидальное поле в воздушном зазоре [7].

Временные гармоники отличаются от пространственных своим происхождением, что сказывается на форме записи уравнений. Подход к составлению уравнений общий, рассмотренный в параграфе 3.11.

Для каждой гармоники записывают уравнения типа (1.100)—(1.105) и составляют систему уравнений

$$\mathbf{U} = \mathbf{zI}, \quad (3.118)$$

где \mathbf{U} — матрица-столбец напряжений; \mathbf{I} — матрица-столбец токов; \mathbf{z} — матрица сопротивлений.

Так как несинусоидальные токи протекают по обмотке, по которой замыкается и 1-я гармоника, без учета вытеснения токов высших гармоник в идеальной машине активные сопротивления, индуктивности и взаимные индуктивности для высших гармоник будут теми же, что и для основной гармоники, а индуктивные сопротивления ωL , ωM и ωL_σ будут определяться частотой гармоники.

В ненасыщенной машине гармоники не связаны друг с другом, поэтому при определении момента при несинусоидальном напряжении питания можно пользоваться моделью рис. 3.78 или 3.79.

Подход к записи уравнений момента при несинусоидальном напряжении питания такой же, что был рассмотрен в параграфе 3.11.

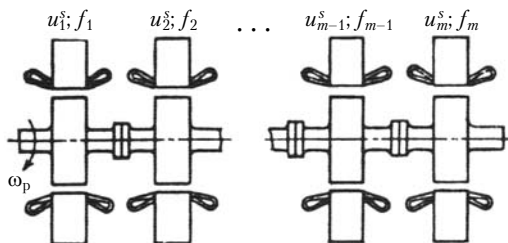


Рис. 3.78. Модель асинхронного двигателя при питании несимметричным несинусоидальным напряжением

Считая, что взаимные индуктивности M между обмотками статора и ротора для высших гармоник одинаковы, получаем

$$M_{эм} = M[(i_{1\beta}^s + i_{2\beta}^s + \dots + i_{m\beta}^s)(i_{1\alpha}^r + i_{2\alpha}^r + \dots + i_{m\alpha}^r) - (i_{1\alpha}^s + i_{2\alpha}^s + \dots + i_{m\alpha}^s)(i_{1\beta}^r + i_{2\beta}^r + \dots + i_{m\beta}^r)]. \quad (3.119)$$

Из выражения (3.119) следует, что электромагнитный момент при несинусоидальном напряжении питания есть произведение несинусоидальных токов статора и ротора. При синусоидальном питании формула (3.119) вырождается в известную формулу для момента (3.4).

Для определения момента в модели, показанной на рис. 3.78, участвуют произведения токов гармоник одного порядка $i_{i\beta}^s i_{i\alpha}^r - i_{i\alpha}^s i_{i\beta}^r$. Исследуя модель с общим ротором (см. рис. 3.79), что ближе к действительности, следует в уравнение момента включить произведения токов разных гармоник $i_{(i+1)\alpha}^s i_{i\alpha}^r - i_{(i+1)\alpha}^s i_{i\beta}^r$.

Произведения токов разных гармоник создают пульсирующие моменты, которые следует учитывать в переходных

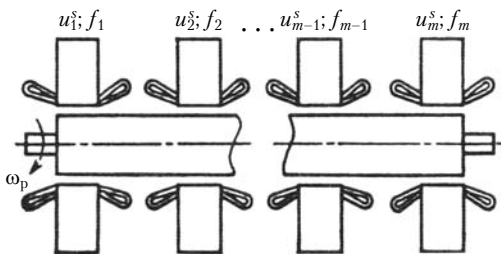


Рис. 3.79. Модель машины с общим ротором, учитывающая пульсирующие моменты

процессах. В установившихся режимах пульсирующие моменты не влияют на электромагнитный момент.

Уравнения асинхронной машины при несинусоидальном напряжении питания решаются на цифровой ЭВМ. С помощью аналоговых ЭВМ также можно исследовать асинхронные машины при несинусоидальном напряжении питания [7].

При несимметричном несинусоидальном напряжении питания, когда формы напряжений на фазах обмотки отличаются друг от друга, каждая гармоника имеет прямую и обратную составляющие. Это увеличивает число гармоник в воздушном зазоре, но не изменяет принципиального подхода к составлению уравнений.

При исследовании переходных и установившихся процессов обычно учитывают три-четыре высшие гармоники. При этом при решении уравнений с раздельной их записью по каждой гармонике решают уравнения 13-го и 17-го порядка [7]. Как показывают исследования, высшие временные гармоники снижают КПД на 10–15%, увеличивают время разгона и вызывают дополнительные вибрации. При расчете асинхронных двигателей, предназначенных для работы при несинусоидальном напряжении, следует на 20–30% снижать электромагнитные нагрузки.

Напряжения с различными частотами не создают в воздушном зазоре вращающихся магнитных полей, как это имеет место при питании обмоток, сдвинутых в пространстве, напряжениями с одной частотой. При питании обмоток двухфазной машины (см. рис. 3.51) синусоидальными напряжениями с различной частотой в воздушном зазоре создаются каждой обмоткой два пульсирующих поля. Поэтому в двухфазной машине при питании обмоток синусоидальными напряжениями, имеющими разную частоту, в зазоре будут четыре гармоники МДС: две прямые и две обратные, вращающиеся с различными частотами.

Большинство асинхронных двигателей работает при синусоидальном или несинусоидальном непрерывно изменяющемся напряжении питания. Непрерывное синусоидальное и несинусоидальное напряжения можно представить состоящими из бесконечного числа изменяющихся по амплитуде импульсов. Эти импульсы можно растянуть во времени и прийти к импульсным электромеханическим системам при определенном сочетании импульсов и некоторых конструктивных изменениях можно получить импульсные

двигатели и генераторы. По своей конструкции импульсные двигатели и генераторы ближе к синхронным машинам и рассматриваются в гл. 4. Для анализа процессов преобразования энергии в таких машинах применяются те же уравнения и те же подходы к их составлению, что и при несинусоидальном несимметричном напряжении питания.

3.17. Аномальные режимы работы асинхронных машин

Номинальные данные электрических машин, указанные на щитке и паспорте машины, — мощность, напряжение, частота сети, ток, частота вращения, $\cos \varphi$, КПД и другие, характеризующие машину, относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря и при температуре газообразной охлаждающей среды до 40°C и охлаждающей воды до 30°C. Нижний предел температуры охлаждающей среды указывается в стандартных или технических условиях на отдельные виды машин. Нижний предел температуры определяется в основном условиями работы смазки подшипников. Асинхронные двигатели серии 4 А предназначены для работы при температуре окружающего воздуха от -40 до +40°C. Относительная влажность воздуха до 98% при температуре 25°C.

При работе машины в условиях, отличающихся от указанных выше, номинальные данные изменяются. При температуре воздуха свыше 40°C предельные допустимые превышения температуры уменьшаются для всех классов изоляционных материалов. При использовании асинхронных двигателей при температуре выше 40°C должна быть снижена номинальная мощность двигателя. Если машина используется на высоте, большей 1000 м над уровнем моря, ухудшаются условия охлаждения, так как при уменьшении плотности воздуха уменьшается масса воздуха, участвующего в охлаждении машины. При этом также снижается номинальная мощность.

Номинальные данные асинхронных двигателей соответствуют номинальному напряжению и частоте сети. Допускается работа двигателей при отклонении напряжения сети в пределах от -5 до +10% и частоты переменного тока на $\pm 2,5\%$ номинального значения. При одновременном отклонении напряжения и частоты сети от номинальных значений двигатели должны сохранять номинальную мощность, если сумма абсолютных процентных значений этих откло-

нений не превосходит 10% и каждое из отклонений не превышает нормы.

При отклонении напряжения или частоты сети от номинальных значений происходит изменение магнитного потока двигателя, которое можно определить из формулы

$$U = 4,44\Phi_m f_1 w_1 k_{об1}. \quad (3.120)$$

Изменение потока двигателя приводит к изменению момента:

$$M = k\Phi_m I_2 \cos \psi_2. \quad (3.121)$$

Если момент на валу остается неизменным, то при уменьшении Φ_m растет ток в статоре и роторе машины. Изменение потока приводит также к изменению тока холостого хода. Так как при номинальных значениях напряжения и частоты сети магнитная система асинхронных двигателей насыщена, небольшие изменения напряжения и частоты приводят к заметным изменениям тока холостого хода.

Влияние U и f_1 на характеристики можно оценить по формулам (3.120) и (3.121). Как увеличение, так и уменьшение U и f_1 по отношению к номинальным значениям отрицательно сказывается на характеристиках машины.

Коэффициент полезного действия и $\cos \phi$ асинхронных двигателей имеют максимум при 0,6—0,8 номинальной мощности. Если двигатель эксплуатируется с недогрузкой при 0,2—0,4 номинальной мощности, целесообразно понизить напряжение. При этом уменьшается намагничивающий ток и увеличивается $\cos \phi$. Улучшение $\cos \phi$ приводит к увеличению КПД. Иногда целесообразно переключить обмотки двигателя с треугольника на звезду. Такое переключение приводит к уменьшению фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз, что вызывает уменьшение потока также в $\sqrt{3}$ раз.

Чтобы момент на валу двигателя остался прежним, надо ток увеличить в $\sqrt{3}$ раз. Относительное увеличение переменных потерь (потерь в меди) и уменьшение постоянных потерь (потерь в стали) смещает максимум КПД для недогруженного двигателя в область нагрузок, при которых длительно эксплуатируется двигатель.

Переключение обмоток не всегда возможно и целесообразно. Поэтому использование двигателей завышенной мощности приводит к неоправданным потерям электроэнергии. Электрические машины должны эксплуатироваться при нагрузках, близких к указанным в паспорте машины.

При эксплуатации асинхронных машин может оказаться, что система трехфазных напряжений, приложенных к статору машины, несимметрична, т.е. фазные напряжения отличаются друг от друга, а углы между напряжениями не равны 120° . Искажение симметрии напряжений связано с различными нагрузками в фазах и аварийными ситуациями.

Несимметричную систему трехфазных напряжений можно разложить на симметричные системы напряжений прямой и обратной последовательности и систему нулевой последовательности. Токи нулевой последовательности при соединении в звезду не создают вращающегося поля в воздушном зазоре. При соединении в треугольник пульсирующее поле от токов нулевой последовательности в первом приближении может не учитываться из-за небольшой амплитуды и отличающейся в 3 раза от прямой и обратной гармоник МДС синхронной частотой вращения.

Напряжения прямой последовательности U_{11} создают токи прямой последовательности статора I_{11} . Эти токи создают в воздушном зазоре поле прямой последовательности. Напряжения обратной последовательности U_{12} создают токи I_{12} и поле обратной последовательности.

Для анализа процессов преобразования энергии в машине при наличии двух полей справедлива модель рис. 3.80, *а* и *б*. Рассматривая действие прямой и обратной последовательностей отдельно (схема рис. 3.80, *а*), можно считать, что результирующий момент

$$M_p = M_1 - M_2, \quad (3.122)$$

где $M_1 = m_1(I'_{11})^2 \frac{r'_2}{s_1}$ — момент прямой последовательности;

$M_2 = m_2(I'_{22})^2 \frac{r'_2}{s_2}$ — момент обратной последовательности.

Ротор по отношению к полю прямой последовательности имеет скольжение

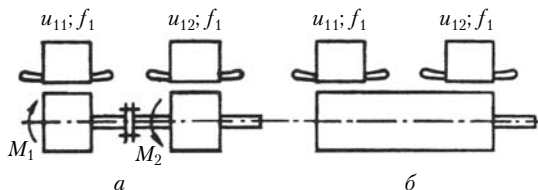


Рис. 3.80. Модель для определения момента без учета (*а*) и с учетом (*б*) пульсирующих моментов

$$s_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (3.123)$$

Скольжение ротора по отношению к полю обратной последовательности

$$s_2 = \frac{n_1 + n_2}{n_1}. \quad (3.124)$$

Подставляя в формулу (3.124) частоту вращения ротора, выраженную через скольжение прямой последовательности, из формулы (3.123)

$$n_2 = (1 - s)n_1, \quad (3.125)$$

получаем

$$s_2 = 2 - s_1. \quad (3.126)$$

В выражение моментов прямой и обратной последовательностей входят токи ротора прямой I_{11} и обратной I_{22} последовательностей.

Для системы напряжений и токов обратной последовательности справедлива схема замещения, аналогичная схеме замещения прямой последовательности (рис. 3.81). В этой схеме \dot{I}_{12} и \dot{I}_{22} — токи обратной последовательности в статоре и роторе. Без учета вытеснения тока для прямой и обратной последовательностей параметры схемы замещения приняты одинаковыми.

Результирующий электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ от токов прямой M_1 и обратной M_2 последовательностей показан на рис. 3.82. Момент от обратной последовательности направлен в сторону, противоположную моменту прямой последовательности. Обычно искажение симметрии небольшое, и момент обратной последовательности меньше момента прямой последовательности. Максимум момента обратной последовательности находится вблизи скольжения $s = 2$.

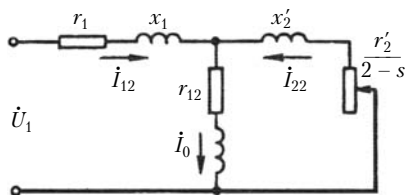


Рис. 3.81. Схема замещения для обратной последовательности

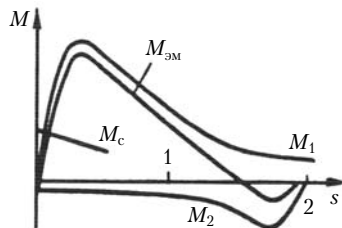


Рис. 3.82. Момент асинхронного двигателя при несимметрии напряжений

Искажение симметрии питающих напряжений изменяет кривую момента двигателя $M = f(s)$. При этом уменьшается максимальный и пусковой моменты, что отрицательно сказывается на характеристиках машины, так как номинальный момент имеет место при больших скольжениях, а следовательно, при больших токах.

В переходных процессах следует определять момент по схеме рис. 3.80, б и учитывать произведения токов разных последовательностей i_{12} , i_{22} и i_{21} , i_{11} , и тогда в результирующем моменте будут четыре составляющие

$$M_{\Sigma M} = M_1 - M_2 + M_{12} - M_{21}. \quad (3.127)$$

При исследовании переходных процессов следует моделировать систему уравнений из восьми уравнений напряжений и уравнению момента (3.127).

При изготовлении машины или эксплуатации может возникнуть несимметрия сопротивлений фаз ротора. В двигателях с короткозамкнутым ротором это связано с заливкой ротора, когда алюминий неравномерно заполняет пазы, а в машинах с фазным ротором — с неисправностью щеточного узла. Вследствие различия сопротивлений фаз ротора токи в фазах ротора отличаются друг от друга. Несимметричную систему токов ротора можно разложить на две симметричные системы токов ротора прямой и обратной последовательностей. Токи ротора прямой последовательности создают поле, неподвижное относительно поля прямой последовательности статора. В результате взаимодействия токов статора и токов прямой последовательности ротора создаются результирующее поле и момент M_1 .

Токи обратной последовательности ротора создают поле, вращающееся с частотой $n_{2p} = sn_1$ относительно ротора в направлении, обратном вращению ротора. Частота вращения поля ротора обратной последовательности относительно статора

$$n_{21} = n_2 - n_{2p} = (1 - s)n_1 - sn_1 = (1 - 2s)n_1. \quad (3.128)$$

Это поле наводит в статоре токи I_{12} с частотой

$$f_{2c} = (1 - 2s)f_1. \quad (3.129)$$

Токи I_{12} замыкаются через сеть и создают в зазоре машины поле, неподвижное относительно токов обратной последовательности ротора. Результирующий момент равен сумме моментов от токов прямой и обратной последовательностей статора и ротора $M_{\Sigma M} = M_1 - M_2$.

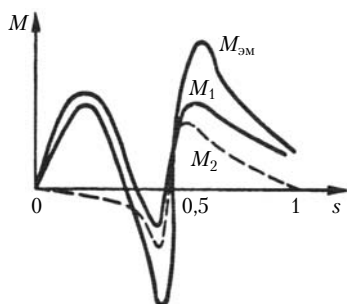


Рис. 3.83. Момент при обрыве фазы обмотки ротора

неподвижно относительно статора (3.128). В этом случае в обмотках статора не наводятся токи от обратного поля ротора и $M_2 = 0$. В кривой момента при $s = 0,5$ появляется «провал» (рис. 3.83), ротор может «застрять» в этом положении; чтобы вывести ротор из этого положения, необходимо затратить энергию. Это явление было описано Г. Гергёсом в 1896 г. и называется эффектом Гергёса, или эффектом одноосного включения, который максимально проявляется при обрыве одной фазы ротора. В таком случае асинхронный двигатель, как правило, не достигает номинальной частоты вращения даже при пуске без нагрузки.

Проводя исследование несимметричных режимов асинхронных двигателей, различают работу симметричного двигателя при несимметричном напряжении питания и работу несимметричного двигателя при симметричном напряжении питания (обычно двигатель несимметричен по статору или ротору). Хотя несимметричные режимы отличаются друг от друга, математические описания процессов преобразования энергии в обоих случаях близки друг к другу. Наиболее общим и более сложным является исследование несимметричного асинхронного двигателя при несимметричном напряжении питания [7].

3.18. Генераторный, тормозной и трансформаторный режимы работы асинхронной машины

Асинхронные машины в основном используются в качестве двигателей. В генераторном режиме они применяются редко. Основная причина этого в том, что асинхронная машина не является источником реактивной мощности. Для

Так как поле обратной последовательности вращается в сторону, противоположную вращению ротора, частота $f_{2с}$ близка к частоте сети и при номинальном скольжении равна 48—49 Гц. Наложение двух близких частот вызывает биеения — низкочастотные качания токов статора и характерный шум двигателя.

При скольжении $s = 0,5$ обратное поле от токов ротора

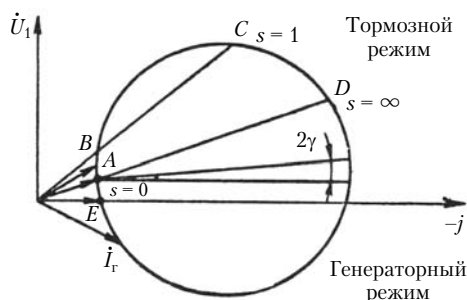


Рис. 3.84. Генераторный и тормозной режимы на круговой диаграмме

создания магнитного поля в асинхронной машине реактивная мощность поступает из сети или от конденсаторов.

Чтобы асинхронный двигатель перевести в генераторный режим, необходимо изменить знак момента, приложенного к валу машины (рис. 3.84). В генераторном режиме асинхронная машина подключается к сети, из которой она потребляет реактивную мощность для создания магнитного поля, а ротор вращается приводным двигателем в сторону вращения магнитного поля с частотой, превышающей синхронную частоту вращения поля. Как и в двигательном режиме, номинальное скольжение в генераторном режиме находится в пределах нескольких процентов, так как при больших скольжениях растут электрические потери и снижается КПД.

На круговой диаграмме генераторный режим занимает часть окружности от точки A до D, где скольжение изменяется от 0 до $-\infty$. При переходе из двигательного в генераторный режим сначала двигатель разгружается и асинхронная машина начинает работать в режиме холостого хода (точка B). При этом из сети забирается активная мощность, необходимая для покрытия потерь холостого хода. Чтобы подойти к точке идеального холостого хода A, надо вращать ротор двигателя приводным устройством. В этом режиме механические потери покрываются за счет механической мощности, поступающей с вала двигателя, а угловая скорость ротора ω_r равна синхронной угловой скорости поля ω_c .

При дальнейшем увеличении скорости (до точки E) активная мощность, поступающая с вала двигателя, расходуется на покрытие потерь в стали и электрических потерь в обмотках ротора и статора. Только перейдя точку E, асин-

хронный генератор отдает электрическую мощность в сеть (ток I_r на круговой диаграмме). Начиная с режима идеального холостого хода, ротор опережает магнитное поле и $\omega_r > \omega_c$. На круговой диаграмме все построения и характерные точки и линии, а также определения скольжения, $\cos \varphi$ и моментов остаются такими же, как и для других режимов работы асинхронной машины.

В генераторном режиме активная мощность отдается в сеть и активный ток на круговой диаграмме при переходе через линию подведенной мощности изменяет свой знак. При этом реактивная мощность направления не изменяет: она во всех режимах работы асинхронной машины поступает из сети. Можно считать, что ток холостого хода I_0 остается практически неизменным во всех режимах работы.

Уравнения установившегося режима асинхронного генератора ничем не отличаются от уравнений двигателя, только ток I'_2 располагается во втором квадранте и векторная диаграмма принимает вид, показанный на рис. 3.17, в.

Как следует из векторной диаграммы, в генераторном режиме $\dot{U}_1 < \dot{E}_1$, векторы токов \dot{I}_1 и \dot{I}'_2 имеют почти противоположное направление по отношению к режиму двигателя, а $\varphi_1 > 90^\circ$. При этом

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0,$$

что свидетельствует о том, что механическая мощность в асинхронном генераторе преобразуется в электрическую и отдается в сеть.

Для асинхронного генератора справедливы такие же схемы замещения, что и для асинхронного двигателя. Отличие состоит лишь в том, что в генераторе мощность на валу $P_2 > P_1$. Параметры схемы замещения и потери определяются так же, как и в режиме двигателя.

Конструктивно асинхронные генераторы не отличаются от двигателей. Как и асинхронные двигатели, асинхронные генераторы могут изготавливаться на мощности в десятки тысяч киловатт. Но на тепловых и гидравлических станциях асинхронные генераторы не нашли большого применения из-за того, что для их работы необходим источник реактивной мощности.

Конструкция ротора асинхронного генератора проще конструкции ротора синхронного. Ротор асинхронного генератора может быть выполнен в виде массивного стального цилиндра без обмоток. Поэтому асинхронные генераторы

могут выполняться на высокие частоты вращения — до 100 000 об/мин.

При применении асинхронных генераторов в автономных энергетических установках в качестве источника реактивной мощности используются конденсаторы (рис. 3.85).

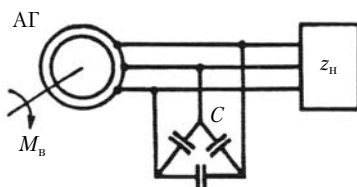


Рис. 3.85. Автономная энергетическая система с асинхронным генератором

Если сопротивление z_n чисто активное, то реактивная мощность конденсаторов равняется реактивной мощности машины $Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1$. Когда z_n содержит индуктивную составляющую, конденсаторы покрывают реактивную мощность машины и нагрузки. При работе асинхронного генератора на активно-емкостную нагрузку можно обойтись без конденсаторов. Следует иметь в виду, что габариты конденсаторной батареи большие и масса ее примерно такая же, что и у двигателя.

В установившемся режиме основные соотношения для асинхронного генератора с самовозбуждением можно определить из схемы замещения (рис. 3.86). Эта схема замещения отличается от схемы замещения асинхронного двигателя лишь тем, что на ее выводы включены сопротивления

нагрузки z_n и конденсатора $x_C = \frac{1}{\omega_1 C}$.

Процесс самовозбуждения асинхронного генератора можно представить следующим образом. При вращении ротора генератора с частотой, близкой к номинальной, за счет остаточного намагничивания ротора наводится ЭДС $E_{ост}$ (рис. 3.87). Эта ЭДС наводит в цепи конденсаторов и машины ток I_{1C} , который усиливает поле машины и создает ЭДС E_1 . Далее токи и МДС возрастают, пока их значения не установятся в точке пересечения характеристики холостого хода генератора с вольт-амперной характеристикой цепи конденсаторов ($x_C I_C$) и не станут равными току I_1 и ЭДС E_1 (см. рис. 3.87).

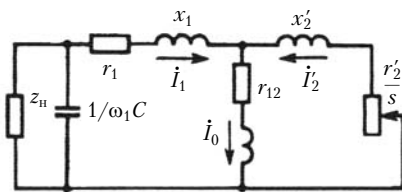


Рис. 3.86. Схема замещения асинхронного генератора с возбуждением от конденсаторов

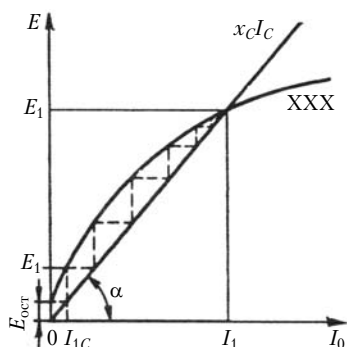


Рис. 3.87. Самовозбуждение асинхронного генератора

асинхронного генератора, можно при постоянной емкости конденсаторов регулировать напряжение на выводах генератора. Изменять насыщение магнитной системы генератора удобно путем подмагничивания спинки статора постоянным током. Изменять плавно емкость силовых конденсаторов трудно. Поэтому при плавном регулировании напряжения асинхронного генератора в цепь конденсаторов последовательно включается реактор и за счет изменения его индуктивности осуществляется регулирование реактивной мощности в системе и напряжения на генераторе.

В асинхронном генераторе, работающем параллельно с сетью, частота задается сетью и не изменяется при изменении режима работы асинхронного генератора. В асинхронном генераторе, работающем в автономной системе, частота напряжения зависит как от частоты вращения ротора, так и от параметров генератора и элементов автономной системы. Это усложняет расчеты режимов работы автономной системы и проектирование асинхронного генератора.

Значительные габариты конденсаторов и громоздкие схемы регулирования ограничивают применение асинхронных генераторов в автономных системах. Схемы с синхронными генераторами находят большее применение.

В тормозном режиме ротор асинхронной машины из-за момента приводного двигателя вращается в сторону, противоположную вращению магнитного поля. Тормозной режим на круговой диаграмме занимает часть окружности от точки C ($s = 1$) до точки D , где $s = +\infty$ (см. рис. 3.84). В этом

режиме $s = \frac{\omega_1 - \omega_p}{\omega_1} > 1$.

Напряжение на генераторе зависит от емкости конденсаторов: чем меньше емкость, тем больше угол α (см. рис. 3.87). При небольших значениях емкости вольт-амперная характеристика $x_C I_C$ не пересекается с характеристикой холостого хода XXX асинхронного генератора и машина не возбуждается. Напряжение на генераторе зависит также от вида характеристики намагничивания. Изменяя насыщение

Особенностью тормозного режима является то, что как электрическая, так и механическая мощность поступает в машину и преобразуется в тепло. Этот режим работы для машины тяжелый и обычно кратковременный.

Переходным режимом торможения является режим противовключения, который применяется для быстрого останова асинхронной машины.

В установившемся режиме тормоза асинхронные машины работают в крановых электроприводах, когда притормаживается груз, опускаемый подъемным краном. Тормозной режим используется в детандерах, когда от струи газа или жидкости отбирается энергия. Чтобы асинхронная машина устойчиво работала в этом режиме и допускалось регулирование частоты вращения, механическая характеристика должна иметь критическое скольжение $s_k \approx 4 \div 5$ (см. рис. 3.40).

В трансформаторном режиме асинхронная машина работает при $s = 1$ (точка *C* на круговой диаграмме рис. 3.84). В этом режиме машина не является электромагнитным преобразователем и не преобразует электрическую энергию в механическую или обратно. Однако на ротор действует момент, который можно определить по круговой диаграмме.

В трансформаторном режиме используются асинхронные машины с фазным ротором. При этом между обмотками статора и ротора возможны трансформаторная и автотрансформаторная связи.

Асинхронная машина с заторможенным ротором, который может поворачиваться относительно статора на электрический угол 360° , называется фазорегулятором (рис. 3.88, *a*).

При повороте ротора относительно статора амплитуда ЭДС на роторе не изменяется, так как ЭДС в роторе наводится вращающимся полем, а фаза (сдвиг между первичным и вторичным напряжениями) изменяется. Векторная диаграмма фазорегулятора дана на рис. 3.88, *б*. Принимая активные и индуктивные сопротивления фазорегулятора равными нулю, можно считать, что $\vec{U}_2 = \vec{E}_2$. При повороте ротора относительно статора изменяется временной угол α между напряжениями статора и ротора

Ротор относительно статора поворачивается вручную или с помощью исполнительного двигателя. На ротор фазорегулятора действует момент, что следует учитывать при расчете редуктора, с помощью которого осуществляется поворот ротора фазорегулятора.

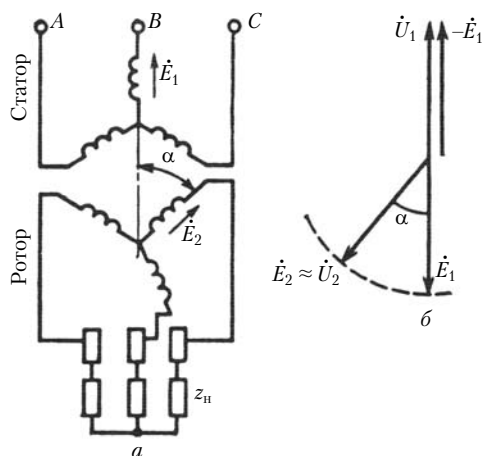


Рис. 3.88. Схема и векторная диаграмма фазорегулятора

Индукционный регулятор применяется для регулирования переменного напряжения двух-, трех- и многофазных систем. Конструктивно индукционный регулятор — заторможенная асинхронная машина с фазным ротором, обмотки статора и ротора которой имеют автотрансформаторную связь (рис. 3.89, а).

При повороте ротора индукционного регулятора напряжение на нагрузке \dot{U}_2 изменяется в соответствии с векторной диаграммой рис. 3.89, б. Напряжение на нагрузке \dot{U}_2 зависит от напряжения сети \dot{U}_1 и соотношения чисел витков на статоре и роторе, которое определяет \dot{E}_2 , равное

$$\dot{E}_2 = -\frac{w_2 k_{o2}}{w_1 k_{o1}} \dot{E}_1, \quad (3.130)$$

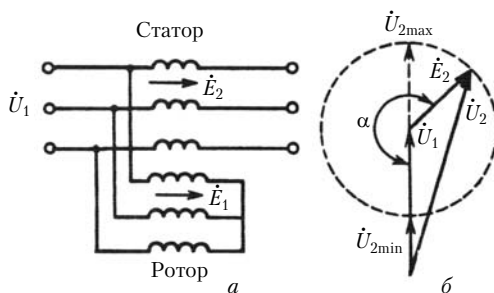


Рис. 3.89. Схема и векторная диаграмма индукционного регулятора

где $\dot{E}_1 \approx \dot{U}_1$; w_1 и w_2 — числа витков ротора и статора; k_{o1} и k_{o2} — обмоточные коэффициенты обмоток ротора и статора.

На векторной диаграмме рис. 3.89, б α — угол между обмотками статора и ротора. При повороте ротора относительно статора конец вектора \dot{U}_2 перемещается по окружности и на выходе индукционного регулятора напряжение изменяется от $\dot{U}_{2\min}$ до $\dot{U}_{2\max}$.

При равенстве чисел витков обмоток статора и ротора $\dot{E}_2 = \dot{E}_1 = \dot{U}_1$. При этом $U_{2\max} \approx 2U_1$, а $U_{2\min} = 0$.

В индукционном регуляторе по схеме рис. 3.89, а при повороте ротора вместе с амплитудой напряжения изменяется и фаза. Если необходимо иметь только изменение напряжения, применяется вдвоенный индукционный регулятор (рис. 3.90, а). Такой индукционный регулятор состоит из двух индукционных регуляторов, у которых обмотки ротора соединены параллельно, а обмотки статора — последовательно. Магнитные поля двух индукционных регуляторов, имеющих общий вал, вращаются в противоположные стороны. Поэтому ЭДС двух роторов при их повороте направлены так, что угол между \dot{U}_1 и \dot{U}_2 не изменяется. Векторная диаграмма вдвоенного индукционного регулятора представлена на рис. 3.90, б. Результирующий момент на валу вдвоенного регулятора равен нулю. Недостаток такого регулятора — удвоение массы по сравнению с обычным индукционным регулятором.

Как и в обычных трансформаторах, в трансформаторах с вращающимся магнитным полем можно получить преобразование числа фаз и частоты.

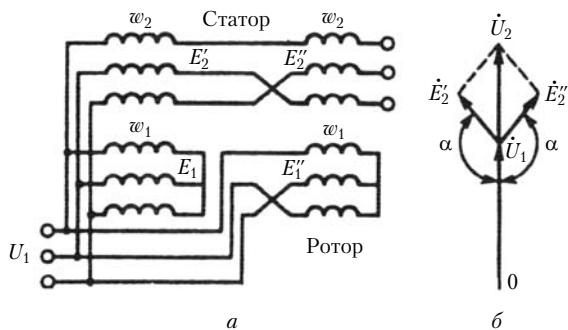


Рис. 3.90. Схема и векторная диаграмма вдвоенного индукционного регулятора

3.19. Однофазные двигатели

Передача и распределение электрической энергии в основном осуществляются трехфазной системой напряжений и токов. Однако в бытовых сетях и на транспорте применяются однофазные системы. Для преобразования электрической энергии в механическую в этих сетях применяются однофазные двигатели. Бытовые однофазные асинхронные двигатели выпускаются промышленностью в количестве нескольких десятков миллионов в год. Основные применения их — в холодильниках, вентиляторах, кондиционерах, насосах и других бытовых приборах.

Однофазный асинхронный двигатель на статоре имеет однофазную обмотку и короткозамкнутый ротор с заливкой пазов алюминием. Конструктивно однофазный двигатель отличается от обычного трехфазного выполнением обмотки статора. Однофазный двигатель получается из трехфазного, когда используются одна или две его фазы (рис. 3.91).

В однофазных двигателях ток статора I_1 создает пульсирующее поле, которое может быть представлено двумя вращающимися в противоположные стороны полями. Прямое и обратное поля имеют одинаковые амплитуды и вращаются в противоположные стороны с одинаковой частотой. Эти поля создают моменты прямой M_{11} и обратной M_{22} последовательностей (рис. 3.92), а результирующий момент

$$M_{\Sigma} = M_{11} - M_{22}. \quad (3.131)$$

При пуске, когда $s = 1$, однофазный двигатель не развивает пускового момента, так как моменты от прямого и обратного полей равны друг другу. Это большой недостаток однофазных двигателей.

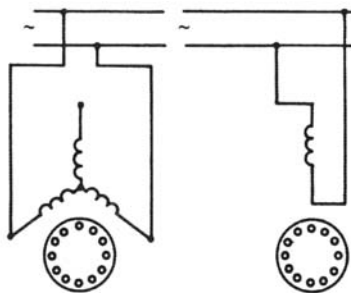


Рис. 3.91. Схемы однофазных двигателей

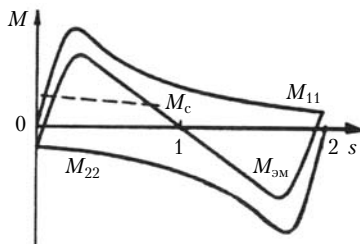


Рис. 3.92. Момент однофазного двигателя

Энергетические характеристики однофазных двигателей хуже характеристик трехфазных, так как при том же моменте сопротивления скольжению у них больше, чем у трехфазного. Увеличение скольжения приводит к возрастанию электрических потерь в роторе, снижению КПД и $\cos \varphi$. Максимальный момент однофазного асинхронного двигателя также ниже, чем трехфазного.

При использовании трехфазного двигателя в качестве однофазного нет необходимости использовать три фазы обмотки. При последовательном включении трех фаз расход меди увеличивается на 50% по сравнению с последовательным включением двух фаз, однако это дает увеличение МДС лишь на 17%, что очевидно из сравнения \vec{F}_2 и \vec{F}_3 , на рис. 3.93. Чтобы использовать три фазы обмотки при однофазном питании, необходимо на одной из фаз поменять начало и концы обмотки.

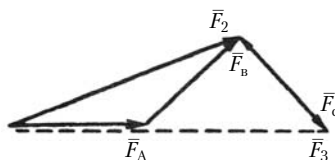


Рис. 3.93. Результирующая МДС при соединении последовательно трех и двух фаз обмотки

Трехфазный двигатель имеет мощность

$$P_3 = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \eta_3 \cos \varphi_3,$$

где η_3 и $\cos \varphi_3$ — КПД и коэффициент мощности в трехфазном режиме. Мощность однофазного двигателя

$$P_1 = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \eta_1 \cos \varphi_1,$$

где η_1 и $\cos \varphi_1$ — КПД и коэффициент мощности однофазного двигателя.

В тех же габаритах мощность однофазного двигателя составляет 50–60% мощности трехфазного. Поэтому работа трехфазного двигателя с номинальной нагрузкой при обрыве одной фазы в однофазном режиме недопустима, так как ток в обмотках двигателя будет значительно больше номинального. Работа трехфазного двигателя при обрыве фазы является одной из причин преждевременного выхода из строя асинхронных двигателей.

Математическая модель однофазного двигателя состоит из двух пар обмоток на статоре и роторе (рис. 3.94). Обмотки $w_{1\alpha}^s$ и $w_{1\beta}^s$ создают прямое поле, и к ним подводятся напряжения $u_{1\alpha}^s = U_m \sin \omega t$ и $u_{1\beta}^s = U_m \cos \omega t$. Обмотки $w_{2\alpha}^s$ и $w_{2\beta}^s$ создают обратное поле, и к ним подводятся напряжения

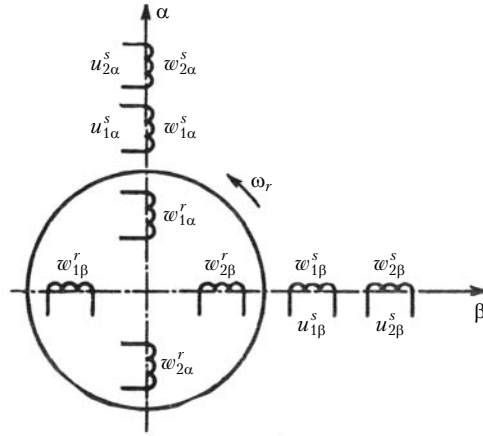


Рис. 3.94. Математическая модель однофазного двигателя

$u_{2\alpha}^s = U_m \cos \omega t$ и $u_{2\beta}^s = U_m \sin \omega t$. Если ротор короткозамкнутый, напряжения на обмотках ротора равны нулю. Если рассматривается ненасыщенный однофазный двигатель, когда связи между прямым и обратным полями отсутствуют, уравнения напряжения записываются в виде

$$\begin{pmatrix} U_{1\alpha}^s \\ U_{2\alpha}^s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{1\beta}^s \\ U_{2\beta}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{1\alpha}^s + pL_{1\alpha}^s & 0 & pM_{11\alpha} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{2\alpha}^s + pL_{2\alpha}^s & 0 & pM_{22\alpha} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ pM_{11\alpha} & 0 & r_{1\alpha}^r + pL_{1\alpha}^r & 0 & L_{1\beta}\omega_p & 0 & M_{11\beta}\omega_p & 0 \\ 0 & pM_{22\alpha} & 0 & r_{2\alpha}^r + pL_{2\alpha}^r & 0 & L_{2\beta}\omega_p & 0 & M_{22\beta}\omega_p \\ -M_{11\alpha}\omega_p & 0 & -L_{1\alpha}\omega_p & 0 & r_{1\beta}^r + pL_{1\beta}^r & 0 & pM_{11\beta} & 0 \\ 0 & -M_{22\alpha}\omega_p & 0 & -L_{2\alpha}\omega_p & 0 & r_{2\beta}^r + pL_{2\beta}^r & 0 & pM_{22\beta} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & pM_{11\alpha} & 0 & r_{1\beta}^s + pL_{1\beta}^s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & pM_{22\alpha} & 0 & r_{2\beta}^s + pL_{2\beta}^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{1\alpha}^s \\ i_{2\alpha}^s \\ i_{1\alpha}^r \\ i_{2\alpha}^r \\ i_{1\beta}^s \\ i_{2\beta}^s \\ i_{1\beta}^r \\ i_{2\beta}^r \end{pmatrix}. \quad (3.132)$$

В системе (3.132) $r_{1\alpha}^s$, $r_{1\beta}^s$, $r_{1\alpha}^r$ и $r_{1\beta}^r$ — активные сопротивления прямой последовательности статора и ротора по осям α и β ; $r_{2\alpha}^s$, $r_{2\beta}^s$, $r_{2\alpha}^r$ и $r_{2\beta}^r$ — активные сопротивления обмоток статора и ротора для обратной последовательности по осям α и β . Активные сопротивления обмотки статора для прямой и обратной последовательностей равны друг другу. Активные сопротивления ротора за счет вытеснения тока несколько отличаются друг от друга. Частоты токов прямой и обратной последовательностей в роторе различны из-за того, что поле прямой последовательности в роторе вращается в сторону вращения ротора, а поле обратной последовательности — в противоположную сторону; $L_{1\alpha}^s$, $L_{1\beta}^s$, $L_{2\alpha}^s$ и $L_{2\beta}^s$ — ин-

дуктивности обмоток статора прямой и обратной последовательностей статора по осям α и β . Эти индуктивности равны друг другу; $L_{1\alpha}^r, L_{1\beta}^r, L_{2\alpha}^r$ и $L_{2\beta}^r$ — индуктивности обмоток ротора по осям α и β . Они также равны друг другу, так как индуктивности определяются геометрией машины; $M_{11\alpha}, M_{11\beta}, M_{22\alpha}$ и $M_{22\beta}$ — взаимные индуктивности между обмотками, которые можно считать одинаковыми и равными M ; $i_{1\alpha}^s, i_{1\beta}^s, i_{1\alpha}^r, i_{1\beta}^r$ — токи прямой последовательности в статоре и роторе по осям α и β ; $i_{2\alpha}^s, i_{2\beta}^s, i_{2\alpha}^r$ и $i_{2\beta}^r$ — токи обратной последовательности в статоре и роторе по осям α и β .

Момент однофазного двигателя определяется из схемы рис. 3.80, в которой к двум статорам независимо подводятся напряжения прямой U_1, f_1 и обратной U_2, f_2 последовательностей. В однофазном двигателе в обмотке ротора протекают токи прямой и обратной последовательностей, поэтому в схеме для определения момента взят один ротор.

Для схем рис. 3.80, б уравнение момента записывается в следующем виде:

$$M_{\text{эм}} = M[(i_{1\beta}^s i_{1\alpha}^r - i_{1\alpha}^s i_{1\beta}^r) - (i_{2\beta}^s i_{2\alpha}^r - i_{2\alpha}^s i_{2\beta}^r) + (i_{1\beta}^s i_{2\alpha}^r - i_{1\alpha}^s i_{2\beta}^r) - (i_{2\beta}^s i_{1\alpha}^r - i_{2\alpha}^s i_{1\beta}^r)]. \quad (3.133)$$

Электромагнитный момент представляет собой алгебраическую сумму четырех слагаемых

$$M_{\text{эм}} = M_{11} - M_{22} + M_{12} - M_{21}, \quad (3.134)$$

где M_{11} — момент прямой последовательности, определяется произведениями токов прямой последовательности (первый член в уравнении (3.133)); M_{22} — момент обратной последовательности, определяется произведениями токов обратной последовательности (второй член в уравнении (3.133)); M_{12} и M_{21} — моменты от токов разных последовательностей в статоре и роторе.

Взаимодействие токов прямой и обратной последовательностей создает пульсирующие моменты, которые в установленном режиме являются причиной вибраций и шума.

Совместное решение уравнений напряжений (3.132) и уравнения движения (3.133) с помощью ЭВМ дает ответы на большинство вопросов, связанных с электромеханическим преобразованием энергии в однофазных двигателях.

Для анализа работы однофазных двигателей использует теория несимметричных режимов трехфазных двигателей. Можно напряжение на обмотке статора однофазного

двигателя представить состоящим из напряжений прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_a - \dot{U}_b = (\dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2}) - (\dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2}) = \\ &= (z_1 \dot{I}_{a1} + z_2 \dot{I}_{a2}) - (z_1 \dot{I}_{b1} + z_2 \dot{I}_{b2}),\end{aligned}\quad (3.135)$$

здесь z_1 и z_2 — сопротивления прямой и обратной последовательностей однофазного двигателя.

Для выражения (3.135) может быть предложена схема замещения, состоящая из двух последовательно соединенных сопротивлений прямой и обратной последовательностей (рис. 3.95). На схеме замещения \dot{I}'_{21} и \dot{I}'_{22} — приведенные токи в роторе прямой и обратной последовательностей; $\dot{I}_{\mu 1}$ и $\dot{I}_{\mu 2}$ — намагничивающие токи прямой и обратной последовательностей, которые в первом приближении можно (при $s \approx 1$) считать одинаковыми. Сопротивления в схеме замещения для статора имеют индекс «1», а для ротора — индекс «2».

Основной недостаток однофазных двигателей — отсутствие пускового момента. Чтобы при однофазном питании двигателя развивал пусковой момент, надо уменьшить момент от обратного поля и увеличить момент от прямого поля (см. рис. 3.92). Необходимо от пульсирующего поля в воздушном зазоре машины перейти к эллиптическому полю. Наилучшие условия при пуске будут при круговом поле, когда момент от обратного поля $M_{22} = 0$. Основные видоизменения конструкции однофазных двигателей направлены к обеспечению удовлетворительных пусковых свойств.

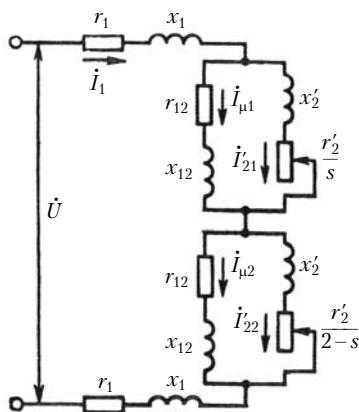


Рис. 3.95. Схема замещения однофазного двигателя

Однофазные конденсаторные двигатели (рис. 3.96) получили наибольшее распространение. В этом двигателе две обмотки на статоре w_α^s , w_β^s сдвинуты относительно друг друга на электрический угол 90° . Чтобы обеспечить сдвиг во времени между токами в обмотках w_α^s и w_β^s , включают рабочий конденсатор C_p .

Конденсатор является лучшим фазосмещающим элементом по сравнению с активным или индуктив-

ным сопротивлением. Для одного из режимов в конденсаторных двигателях при постоянной емкости можно получить круговое поле, уменьшив до нуля обратное поле. Чтобы в воздушном зазоре поле было близким к круговому от режима пуска до номинального режима, необходимо изменять емкость. Поэтому в некоторых случаях на время пуска дополнительно к рабочему конденсатору C_p подключают пусковой конденсатор C_n , который отключается после пуска двигателя. Так как пусковой конденсатор работает в кратковременном режиме, его габариты небольшие. Емкость рабочего конденсатора рассчитывается на продолжительный режим работы. Пусковой конденсатор должен обеспечивать круговое поле при пуске при номинальной нагрузке.

В конденсаторном двигателе, у которого постоянно включен в фазу β конденсатор C_p , рассчитанный на круговое поле в номинальном режиме, мощность обоих обмоток одинакова. Однако число витков в фазах α и β может быть различно. Отношение чисел витков в фазах

$$\frac{w_\alpha^s}{w_\beta^s} = \frac{u_\alpha}{u_\beta} = k \quad (3.136)$$

есть коэффициент трансформации конденсаторного двигателя.

При круговом поле напряжения фаз сдвинуты на электрический угол 90° и $u_\beta^s = k u_\alpha^s$, а МДС обмоток

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_\beta w_\beta^s k_{об\beta} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_\alpha w_\alpha^s k_{об\alpha}. \quad (3.137)$$

При этом токи I_α и I_β также сдвинуты на электрический угол 90° . Кроме того, углы между напряжениями и токами в фазах α и β и угол между напряжением сети и общим током одинаковы. Поэтому векторная диаграмма конденсаторного двигателя выглядит так, как показано на рис. 3.97. Напряжение на конденсаторе

$$\dot{U}_C = \dot{U}_\alpha + \dot{U}_\beta, \quad (3.138)$$

а напряжение в фазе α равно напряжению сети: $\dot{U}_\alpha = \dot{U}$.

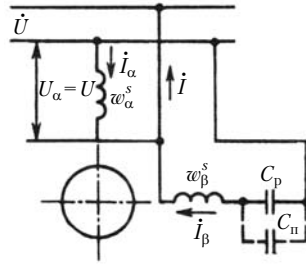


Рис. 3.96. Однофазный конденсаторный двигатель

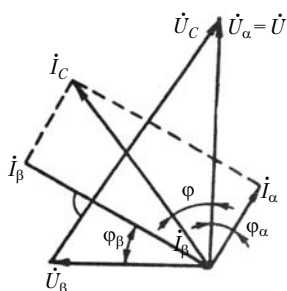


Рис. 3.97. Векторная диаграмма конденсаторного двигателя

Тогда

$$U_C = \frac{U_\beta}{\sin \varphi_\alpha}, \quad (3.139)$$

где из векторной диаграммы $\sin \varphi_\alpha = \sin \varphi_\beta$.

Емкость конденсатора, необходимая для получения кругового поля, определится из выражения

$$I_\beta = \frac{U_C}{x_C}. \quad (3.140)$$

После подстановки формулы (3.139) в формулу (3.140) имеем

$$C = \frac{I_\beta \sin \varphi_\beta}{\omega U_\beta}. \quad (3.141)$$

Емкость, необходимая для получения кругового поля, достаточно большая и занимает объем, близкий к объему самого двигателя, что является недостатком конденсаторных двигателей.

Энергетические показатели конденсаторного двигателя благодаря круговому полю в воздушном зазоре такие же, как и у трехфазного двигателя. Таким же оказывается и использование материалов.

Конденсаторные двигатели выпускаются большими сериями как с пусковой, так и с рабочей емкостью, на мощности от 18 до 600 Вт.

Одной из разновидностей однофазных асинхронных двигателей являются двигатели с экранированными полюсами или, как их еще называют, однофазные двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе. В таких двигателях статор имеет явно выраженные полюсы, на которых располагается однофазная катушечная обмотка 1 (рис. 3.98). Каждый полюс продольным пазом разделен на две неравные части. Меньшую часть

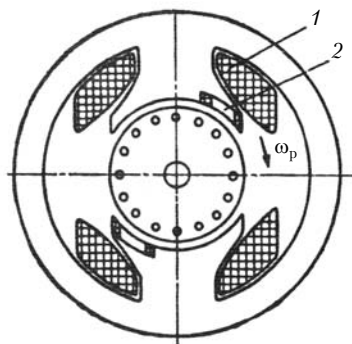


Рис. 3.98. Однофазный двигатель с короткозамкнутым витком на полюсе

полюсного наконечника охватывает короткозамкнутый виток 2. Штампованный из листов электротехнической стали магнитопровод статора образует полюсные наконечники и спинку статора. Ротор двигателя — обычный, с короткозамкнутой обмоткой.

Ток, протекающий в обмотке статора \dot{I}_1 , создает пульсирующий поток, который наводит в короткозамкнутом витке ток \dot{I}_k . Индуктивные и активные сопротивления обмотки и короткозамкнутого витка различны, поэтому токи \dot{I}_1 и \dot{I}_k сдвинуты во времени, а оси обмоток сдвинуты в пространстве.

Из-за пространственного сдвига обмоток статора и временного сдвига потоков в воздушном зазоре между ротором и полюсным наконечником образуется вращающееся поле. Оно имеет прямую и обратную составляющие и отличается от пульсирующего поля, которое было бы в зазоре при отсутствии короткозамкнутого витка.

Однофазные двигатели с экранированными полюсами имеют при пуске момент, равный $(0,2 \div 0,5)M_{\text{ном}}$. Двигатель имеет низкий КПД, равный 25—40%. Однофазные двигатели с экранированными полюсами в основном выпускаются на мощности 20—50 Вт, а иногда до 300 Вт. Такие двигатели применяются в вентиляторах, кондиционерах, проигрывателях и других установках с вентиляторной характеристикой момента нагрузки.

Двигатели с экранированными полюсами неререверсивные. Направление вращения ротора у них определенное — от широкой части полюсного наконечника к короткозамкнутому витку (см. рис. 3.98).

Однофазные двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе имеют целый ряд модификаций: с двумя или тремя короткозамкнутыми витками, несимметричной магнитной системой и др.

Однофазные асинхронные двигатели в отличие от двухфазных и трехфазных — несимметричные электрические машины. В этих машинах электрический угол сдвига второй обмотки может быть равен 90° , а параметры — индуктивные и активные сопротивления обмоток — могут различаться. Поэтому в этих машинах есть пространственная, электрическая и магнитная несимметрия. Несимметрия приводит к появлению обратного поля, что является причиной ухудшения энергетических характеристик таких машин.

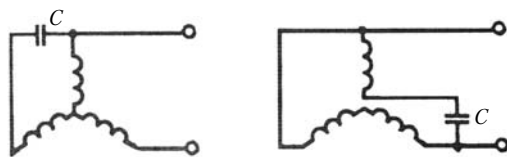


Рис. 3.99. Схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть

Трехфазные двигатели могут использоваться как однофазные. Наиболее распространенные схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть даны на рис. 3.99. При таком включении обмотки сдвинуты относительно друг друга на электрический угол 90° , а конденсатор обеспечивает сдвиг токов, поэтому поле в зазоре близко к круговому. Двигатели, которые могут использоваться как трехфазные и однофазные, называются универсальными.

3.20. Специальные асинхронные машины

Понятие «специальные машины» отражает специфику применения машин и связанные с этим конструктивные видоизменения. Применения асинхронных машин непрерывно расширяются, и их многообразие нельзя описать при ограниченном объеме книги, поэтому ниже рассматриваются лишь отдельные основные группы специальных асинхронных машин. Многочисленная группа специальных асинхронных машин, применяемых в системах автоматического управления, описана в параграфе 3.21.

Одной из ветвей конструктивного видоизменения асинхронных машин являются машины с двумя роторами и в пределе машина с n роторами. На рис. 3.100 показана конструкция машины с двумя роторами. Внутренний ротор 1 обычный с короткозамкнутой обмоткой, а второй ротор выполнен в виде полого цилиндра 2. Статор 3 — традиционной конструкции. Первый ротор может использоваться для вращения вентилятора, который обеспечивает отвод тепла, а двигатель с полым ротором используется как исполнительный двигатель. При регулировании напряжения частота вращения вентилятора изменяется мало, так как короткозамкнутый ротор имеет небольшое активное сопротивление, а частота вращения полого ротора при изменении напряжения изменяется в широких пределах.

Система уравнений, описывающая процессы преобразования энергии в машине с двумя роторами, состоит из двух уравнений движения и шести уравнений напряжения.

Можно представить машину с тремя, четырьмя и n роторами и составить для них математическую модель. Ма-

тематическая модель машины с несколькими или n роторами подходит для анализа процессов электромеханического преобразования энергии в машинах с жидким ротором. Машины с жидким ротором называются также магнитогиродинамическими машинами (МГД-машинами).

Магнитогиродинамические двигатели — насосы состоят из двух неподвижных статоров — одного с обмоткой и второго (внутреннего статора) без обмотки. Между стальными сердечниками обычно имеются тепловые экраны, предохраняющие сердечники и обмотки от попадания жидкости и снижающие гидравлическое сопротивление. Вращающееся магнитное поле наводит в жидкости — роторе машины — токи, и электромагнитные силы увлекают жидкость. Чтобы получить осевые перемещения жидкости, один из статоров или оба имеют винтовую нарезку. Жидкий ротор, так же как и массивный ротор (см. рис. 3.55), можно разделить на n слоев. Каждый слой имеет механическую связь с другими слоями, и при вращении жидкости имеет место сложное взаимодействие между слоями, определяемое как магнитным полем, так и механическими воздействиями. В первом приближении n слоев жидкости можно заменить одним слоем и рассматривать процессы преобразования энергии, как в асинхронной машине с одним ротором.

Индукционные насосы находят применение в атомных реакторах для отбора тепла из радиоактивного контура. В качестве теплоносителя используются жидкие металлы и сплавы — натрий, калий и их соединения. Находят применение установки для перемешивания жидких металлов в металлургической промышленности и в литейном производстве.

В МГД-машинах жидкий ротор может быть заменен электропроводящим газом или плазмой. Асинхронные двигатели с газообразным ротором не нашли применения.

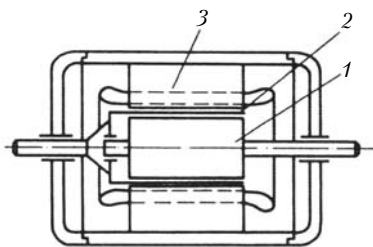


Рис. 3.100. Асинхронный двигатель с двумя роторами

Как и все электрические машины, МГД-машины обратимы. Прогоняя жидкость или газ в магнитном поле, можно создать МГД-генераторы. В индукционных насосах, чтобы получить генераторный режим работы, достаточно прогонять жидкость со скоростью, большей скорости движения магнитного поля.

Линейные двигатели отличаются от обычных асинхронных двигателей тем, что они имеют разомкнутый магнитопровод, и круговое поле в воздушном зазоре линейных двигателей ни при каких условиях не может быть получено. Если в обычном асинхронном двигателе выполнить магнитопровод в виде дуги, получим машину с дуговым статором (рис. 3.101, а). Такие двигатели удобно встраиваются в механизм, они находят применение в приводах сепараторов и установках для перемешивания металла.

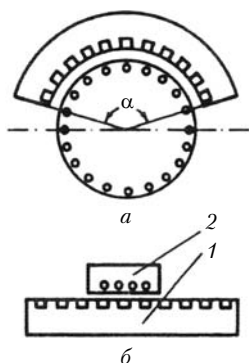


Рис. 3.101. Двигатель с сегментным (дуговым) ротором (а) и линейный двигатель (б)

Принципиальным недостатком таких машин является появление в воздушном зазоре отраженных волн. Если в обычной электрической машине в воздушном зазоре образуются бегущие волны, которые укладываются по окружности статора целое число раз, то в машине с дуговым статором бегущая волна магнитного поля, отражаясь от краев магнитопровода, искажается, порождая бесчисленное число отраженных от обоих краев волн магнитного поля. Это явление принято называть краевым эффектом. Краевые эффекты ухудшают энергетические показатели машины, что ограничивает возможности применения таких машин.

Картина поля в воздушном зазоре асинхронного линейного двигателя определяется во многом длиной дуги статора α (см. рис. 3.101, а). При числе пар полюсов p и частоте сети f_1 частота вращения

$$n_1 = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{f_1}{p}. \quad (3.142)$$

При $\alpha = 2\pi$, когда статор полностью охватывает ротор, получается обычная машина и синхронная частота вращения $n_1 = f_1/p$.

Условия электромеханического преобразования энергии, близкие к условиям в машинах с дуговым статором, имеются в обычных асинхронных двигателях, когда используется только часть обмотки статора. Если в трехфазном двигателе отключить одну фазу, а две оставшиеся подключить к двухфазной системе напряжений, то вращающееся поле будет создано лишь на части статора, занятой обмоткой, обтекаемой токами. В этом случае появятся отраженные волны магнитного поля от участков статора, занятых секциями обмотки отключенной фазы. Хотя в этом случае нет явно выраженных границ магнитопровода, краевые эффекты проявляются почти так же, как в машинах с дуговым статором.

При проектировании электрических машин необходимо стремиться как к магнитной симметрии, так и к электрической симметрии, когда обмотки статора и ротора занимают всю зубцовую зону. Если в машине с дуговым статором увеличить радиус до бесконечности, получим линейный двигатель, показанный на рис. 3.101, б. В линейном двигателе может быть статор 1 длиннее ротора или наоборот. Ротор в линейных двигателях часто называют бегуном 2.

В воздушном зазоре линейного двигателя, так же как и в двигателе с дуговым статором, за счет отраженных волн магнитное поле сильно искажается и не может быть круговым. В первом приближении магнитное поле в зазоре линейного двигателя можно рассматривать как эллиптическое поле с достаточно большой амплитудой обратного поля.

Конструкции линейных асинхронных двигателей весьма разнообразны. Бегун может выполняться в виде массивного ротора или с короткозамкнутой обмоткой, расположенной в пазах. Чтобы избежать магнитных тяжений, линейный двигатель может иметь ротор, расположенный между двумя статорами. Возможно применение обращенной конструкции, когда короткозамкнутый ротор неподвижен, а движется статор с фазной обмоткой.

Линейные двигатели находят применение для получения возвратно-поступательного движения. Однако в этом случае применение их целесообразно там, где допустимы низкие энергетические показатели. Коэффициент полезного действия в этом случае низкий из-за искажения поля в воздушном зазоре, а также из-за того, что при пусках и остановках двигателя большая часть энергии, забираемая из сети, преобразуется в тепло. Непрерывные переходные процессы при реверсировании двигателя резко снижают КПД и $\cos \phi$.

Прежде чем пойти на применение линейного двигателя для получения возвратно-поступательного движения, необходимо сравнить его с обычным двигателем и механической системой для получения возвратно-поступательного движения.

Линейные двигатели могут использоваться для различных транспортных устройств. Одним из возможных вариантов является использование в качестве бегуна экипажа, перемещающегося вдоль полотна, представляющего собой статор длиной в десятки и сотни километров. При магнитном подвесе экипажа могут быть достигнуты скорости в несколько сотен километров в час. Однако такие установки требуют большие мощности, необходимые для высокоскоростного транспорта, что и осложняет их массовое применение. Большие перспективы, на наш взгляд, имеет грузовой транспорт с линейными двигателями при сравнительно низких скоростях движения.

Важным направлением применения линейных двигателей является использование их для ускорения или замедления больших масс движущихся объектов.

Линейные асинхронные двигатели используются в качестве насосов, когда ротором является жидкость. Плоские насосы имеют два статора с обмоткой 1, между которыми находится канал прямоугольного сечения 2 с жидким металлом (рис. 3.102). Для линейных асинхронных двигателей с жидким ротором недостатки из-за турбулентного течения жидкости в канале только усугубляются.

Линейные электрические машины применяются практически только в двигательном режиме. В генераторном режиме находит применение МГД-генератор — электромеханический преобразователь энергии. МГД-генератор на выходе обычно дает постоянное напряжение и ток (параграф 5.12). Но при пульсациях магнитного поля или скорости плазмы на выходе можно получить переменные напряжение и ток. Такой генератор по принципу действия и конструкции близок к линейным двигателям и МГД-насосам.

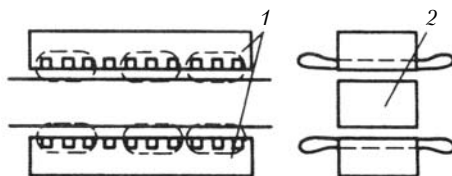


Рис. 3.102. Насос, выполненный на базе линейного двигателя

Во всех машинах, которые рассматривались до сих пор, вращалась только одна часть машины — ротор. Однако можно сделать машину, у которой будут вращаться и ротор, и статор (рис. 3.103). Неподвижную часть принято называть статором, поэтому лучше говорить о машине с двумя роторами. В двухмерной машине или машине с двумя степенями свободы внутренний 1 и внешний роторы 2 вращаются относительно друг друга в противоположные стороны. На валу имеется двойной комплект контактных колец 3, через которые обеспечивается связь с вращающимися обмотками. Электромагнитный момент приложен к внутреннему и внешнему роторам. При этом угловые скорости внешнего $\omega_{\text{вн}}$ и внутреннего $\omega_{\text{вт}}$ роторов в сумме примерно равны синхронной угловой скорости поля ω_c .

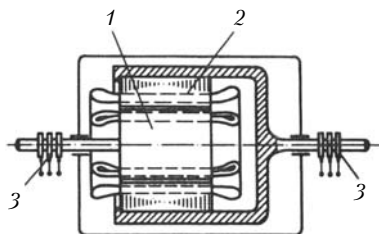


Рис. 3.103. Двухмерная электрическая машина

Машина с двумя вращающимися роторами имеет две степени свободы и описывается системой четырех уравнений напряжений, двумя уравнениями движения и уравнением, связывающим угловые скорости:

$$\begin{pmatrix} u_{\alpha}^s \\ u_{\alpha}^r \\ u_{\beta}^r \\ u_{\beta}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{\alpha}^s + \frac{d}{dt}L_{\alpha}^s & \frac{d}{dt}M & L_{\beta}^r\omega_{\text{вн}} & M\omega_{\text{вн}} \\ \frac{d}{dt}M & r_{\alpha}^r + \frac{d}{dt}L_{\alpha}^r & L_{\beta}^r\omega_{\text{вн}} & M\omega_{\text{вн}} \\ -M\omega_{\text{вн}} & -L_{\alpha}^r\omega_{\text{вн}} & r_{\beta}^r + \frac{d}{dt}L_{\beta}^r & \frac{d}{dt}M \\ -M\omega_{\text{вн}} & -L_{\alpha}^r\omega_{\text{вн}} & \frac{d}{dt}M & r_{\beta}^s + \frac{d}{dt}L_{\beta}^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{\alpha}^s \\ i_{\alpha}^r \\ i_{\beta}^r \\ i_{\beta}^s \end{pmatrix}; \quad (3.143)$$

$$M_{\text{эм}} = pM(i_{\alpha}^r i_{\beta}^s - i_{\alpha}^s i_{\beta}^r); \quad (3.144)$$

$$\begin{cases} \frac{J_{\text{вн}}}{p} \frac{d\omega_{\text{вн}}}{dt} = M_{\text{эм}} - M_{\text{вн}}, \\ \frac{J_{\text{вн}}}{p} \frac{d\omega_{\text{вн}}}{dt} = M_{\text{эм}} - M_{\text{вн}}; \end{cases} \quad (3.145)$$

$$\omega_c = \omega_{\text{вт}} + \omega_{\text{вн}}. \quad (3.146)$$

Уравнения двухмерной электрической машины (3.143)–(3.146) отличаются от уравнений одномерной машины тем,

что в уравнениях напряжений, относящихся к внутреннему и внешнему роторам, есть члены, определяющие ЭДС вращения, так как обе части вращаются. В уравнения движения входят моменты инерции внешнего $J_{\text{вн}}$ и внутреннего $J_{\text{вн}}$ статоров, а также моменты сопротивлений, приложенные к обоим роторам, $M_{\text{вн}}$ и $M_{\text{вн}}$.

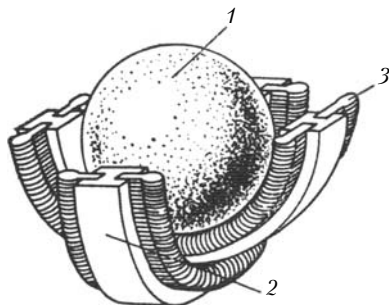


Рис. 3.104. Трехмерный асинхронный двигатель

Трехмерная электрическая машина, показанная на рис. 3.104, имеет два полукольцевых статора 2 и 3 и ротор 1 в виде шара. Ротор подвешен над статорами и в зависимости от моментов, создаваемых статорами, вращается в трехмерном пространстве.

Если в трехмерной машине (рис. 3.104) вращаются и ротор, и статор, это будет шестимерная машина. Изучение процессов преобразования энергии в многомерных электрических машинах имеет важное значение для космической электромеханики, когда масса, с которой соединен статор электрической машины, соизмерима с массой ротора и вращение электрических машин влияет на ориентацию корабля.

Процессы электромеханического преобразования в многомерных электромеханических преобразователях описываются гораздо более сложными уравнениями. Уравнения машин с одной вращающейся частью являются частным случаем уравнений машин с несколькими степенями свободы. Подходить к уравнениям многомерных машин, наращивая их сложность и двигаясь от уравнений обычных одномерных машин, надо очень осторожно. Уже в двухмерной машине понятие скольжения — относительной частоты вращения — усложняется, а момент инерции влияет на значение установившейся частоты вращения. Многомерная электрическая машина с n степенями свободы не может преобразовывать энергию в механическую и обратно, так как из выражения (3.146) следует, что частота вращения в такой машине стремится к нулю, n -мерная машина работает как электромагнитный преобразователь [7].

За счет несимметричного расположения ротора внутри статора можно получить электрические машины с новыми качествами.

В двигателях с катящимся ротором ротор с короткозамкнутой обмоткой расположен эксцентрично относительно статора (рис. 3.105).

Вращающий момент в таком двигателе создается за счет сил одностороннего магнитного притяжения. Из-за большой несимметрии воздушного зазора электромагнитный момент формируется из произведений токов в обмотках статора и ротора, расположенных в разных осях и по одной оси. В уравнении момента обобщенной машины появляются произведения токов в обмотках статора $i_{\alpha}^s i_{\alpha}^r$ и ротора $i_{\beta}^s i_{\beta}^r$, расположенных по одной оси.

Несимметричное магнитное поле поворачивает ротор в точке касания его со статором, а также будет перемещаться ось ротора по малой окружности, показанной на рис. 3.105 штриховой линией. При этом частота вращения ротора зависит от разности длин окружности статора и ротора или разности радиусов статора R_s и ротора R_r :

$$\omega_p = 2\pi \frac{R_s - R_r}{R_r} \quad (3.147)$$

или

$$n_2 = n_1 \frac{R_s - R_r}{R_r}. \quad (3.148)$$

Несимметрия магнитного поля в двигателях с катящимся ротором достигается не только за счет несимметрии зазора, но и за счет схем обмоток и схем питания. Недостатками таких двигателей являются большой шум, износ катков, по которым перемещается ротор, и необходимость в специальных передачах от вала двигателя к приводному механизму.

В двигателях с волновым ротором ротор деформируется под действием сил магнитного тяжения. При вращении поля волны деформации перемещаются синхронно с полем и происходит обкатывание статора 2 ротором 1. При этом, когда поле сделает один оборот, ротор повернется вокруг своей оси на угол, равный разности длин окружностей ста-

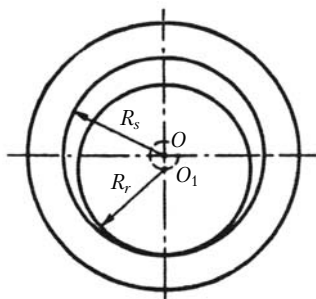


Рис. 3.105. Двигатель с катящимся ротором

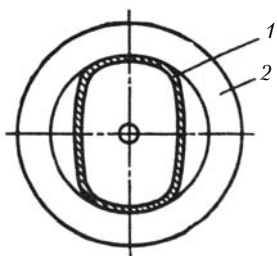


Рис. 3.106. Двигатель с волновым ротором

тора и ротора (рис. 3.106). По принципу действия этот двигатель аналогичен двигателю с катящимся ротором и ему присущи те же недостатки.

Здесь кратко рассмотрены только основные конструктивные видоизменения асинхронных машин, которые далеко не исчерпывают всего многообразия специальных асинхронных машин.

3.21. Асинхронные машины автоматических устройств

К машинам, применяемым в автоматических устройствах, в первую очередь относятся асинхронные исполнительные двигатели, которые должны обеспечивать высокий диапазон изменения частоты вращения при линейных механических и регулировочных характеристиках. Исполнительные двигатели должны иметь высокое быстродействие, большой пусковой момент, малую мощность управления, малый момент трения, а также не иметь самохода при уменьшении напряжения управления до нуля.

Этим противоречивым требованиям в основном удовлетворяют двухфазные асинхронные двигатели с полым ротором и двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора с повышенным активным сопротивлением. Двигатели с полым ротором, рассмотренные в параграфе 3.15, выполняются на мощность до 30 Вт, а двигатели с короткозамкнутым ротором с повышенным сопротивлением — до 500 Вт. Исполнительные асинхронные двигатели могут изготавливаться на мощность и в несколько киловатт.

Исполнительные асинхронные двигатели на сотни ватт выполняются с шихтованным ротором, а короткозамкнутая обмотка заливается сплавами алюминия с повышенным сопротивлением или сваривается из латуни или бронзы. Используются также двигатели с массивным ротором, рассмотренные в параграфе 3.15, которые имеют худшие энергетические и массогабаритные показатели по сравнению с двигателями с шихтованным ротором. Двигатели с массивным ротором применяются в высокоскоростных приводах, в которых двигатели с короткозамкнутой обмоткой из-за недостаточной механической прочности применяться не могут.

В асинхронных исполнительных двигателях основной проблемой является отвод тепла, которое выделяется в машине при глубоком регулировании частоты вращения. Для лучшего охлаждения исполнительных двигателей применяются вентиляторы-наездники, частота вращения которых не зависит от частоты вращения исполнительного двигателя, используются также охлаждение водой и внутреннее испарительное охлаждение. В исполнительных микродвигателях интенсивный отвод тепла осуществляется также путем увеличения поверхности охлаждения.

Для плавного регулирования частоты вращения асинхронных исполнительных двигателей применяется два способа: частотный (изменение частоты напряжения) и изменением напряжения (изменение скольжения за счет амплитуды и фазы питающего напряжения). Наибольшее распространение получил второй способ, так как преобразователи частоты, несмотря на применение силовых полупроводниковых элементов, остаются громоздкими и дорогими. При регулировании частоты вращения исполнительных двигателей путем изменения напряжения применяют три способа управления: амплитудное, фазное и амплитудно-фазное. При амплитудном регулировании изменяется амплитуда подводимого к двигателю напряжения, при фазном — фаза напряжения, а при амплитудно-фазном изменяются и амплитуда, и фаза напряжения.

При изменении амплитуды или фазы питающего напряжения изменяется форма поля в воздушном зазоре из-за изменения амплитуд прямого и обратного полей. Таким образом, за счет изменения степени эллиптичности поля в воздушном зазоре осуществляется регулирование частоты вращения.

В системах автоматического управления мощностью до 1 кВт обычно применяются двухфазные двигатели, когда одна обмотка (обмотка возбуждения w_B) подключена к сети, а обмотка управления w_y питается через регулятор напряжения РН (рис. 3.107). В исполнительных двигателях мощностью больше 1 кВт используются трехфазные двигатели, когда каждая фаза обмотки через регулятор напряжения подключается к сети.

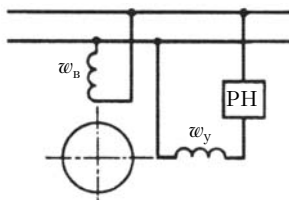


Рис. 3.107. Схема управления двухфазным двигателем

В последнее время в качестве управляющих элементов применяются регуляторы напряжения на тиристорах и транзисторах, находят также применение схемы на магнитных усилителях. Следует отметить, что управляющие элементы имеют большие габариты, так как они рассчитываются на полную или на часть мощности системы. Габариты и стоимость управляющих элементов возрастают в реверсивных системах, когда необходимо изменять направление вращения и регулировать частоту вращения в широких пределах.

Стремление снизить массу всей системы регулирования приводит к попытке объединить исполнительный двигатель и регулятор напряжения или преобразователь частоты в одном агрегате и за счет лучшего использования материалов получить общее снижение массы электромеханической системы.

Удачным совмещением исполнительного асинхронного двигателя и магнитных усилителей являются двигатели-усилители (рис. 3.108). В двигателях-усилителях обмотки магнитных усилителей наматываются на спинку магнитопровода статора, а обмотки двигателя 1 и магнитного усилителя 2 укладываются в пазы. Обмотки переменного тока наматываются на спинку статора каждого пакета 3, а обмотки управления охватывают оба пакета. В ярме статора пото-

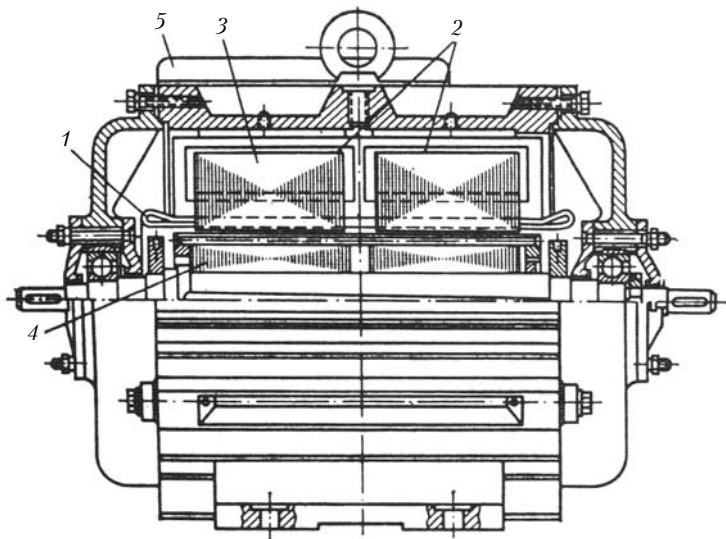


Рис. 3.108. Асинхронный двигатель-усилитель

ки магнитного усилителя и двигателя складываются. Сталь ярма статора является магнитопроводом магнитных усилителей и двигателя. Ротор 4 короткозамкнутый.

В коробке выводов 5 двигателя-усилителя помещаются диоды магнитных усилителей. В специальных машинах обычно коробки выводов имеют увеличенные размеры, так как в них располагаются различные элементы систем управления. Благодаря тому, что силовые обмотки магнитных усилителей соединены последовательно с обмоткой статора двигателя, при работе системы напряжение сети перераспределяется между магнитным усилителем и двигателем так, что суммарный магнитный поток практически не изменяется. Когда магнитные усилители не насыщены, их поток максимален, а при насыщении магнитных усилителей магнитный поток максимален в исполнительном двигателе. В промежуточных режимах поток перераспределяется между магнитными усилителями и двигателем. Двигатели-усилители обеспечивают снижение массы по сравнению с раздельной системой в 1,2—1,5 раза и, несмотря на применение регуляторов напряжения на тиристорах, являются наименее металлоемкими системами.

Для управления различными механизмами применяют микроЭВМ — микропроцессоры. Упрощение технологии изготовления и увеличение надежности микропроцессоров приводит к тому, что они встраиваются в электрические машины, чтобы получить простейшие самонастраивающиеся электромеханические системы.

В системах автоматического управления для приводных механизмов часто требуются низкие частоты вращения и большие моменты. Получить низкую частоту вращения, имея частоту сети 50 или 400 Гц, можно путем увеличения числа полюсов двигателя. Однако увеличение числа полюсов ограничивается технологическими причинами, так как нельзя из-за наклепа сделать ширину зубцов меньше примерно 1,2 мм, а диаметр двигателя, как правило, ограничен. Применение механических редукторов усложняет и снижает точность электромеханической системы.

Электрические машины позволяют получить электромагнитную редукцию частоты вращения. В основе электромагнитной редукции лежит использование пространственных гармоник и несимметрии воздушного зазора в двигателях с ротором индукторного типа, с катящимся или волновым ротором.

В редукторных двигателях в качестве основной гармоники используется 5-я или 7-я пространственная гармоника, которая имеет в 5–7 раз меньшие синхронные частоты вращения. При определенных соотношениях чисел зубцов на роторе и статоре и числа пар полюсов высшие пространственные гармоники имеют амплитуду большую, чем 1-я, и двигатель работает на высшей пространственной гармонике как на основной.

Недостатком редукторных двигателей являются низкий КПД и разброс характеристик, зависящий от технологии изготовления двигателя.

В настоящее время созданы электромеханические системы с исполнительными двигателями, обеспечивающие равномерную частоту вращения в один оборот и доли оборота в сутки.

Наибольшие трудности существуют при создании моментных асинхронных двигателей с большими моментами при $\omega_p \approx 0$, а также обеспечивающих глубокое регулирование частоты вращения.

В генераторном режиме асинхронные машины в системах автоматического управления широко используются в качестве тахогенераторов — датчиков частоты вращения и датчиков ускорения.

По своей конструкции асинхронные тахогенераторы ничем не отличаются от асинхронных двигателей с полым ротором. К одной из обмоток статора — обмотке возбуждения w_α^s подводится переменное напряжение U_B . При вращении ротора со второй обмотки статора w_β^s , сдвинутой на электрический угол 90° по отношению к обмотке возбуждения, снимается напряжение U_T , которое пропорционально частоте вращения (рис. 3.109).

При неподвижном роторе, когда $\omega_p = 0$, в обмотке w_β^s ЭДС не наводится и $U_T = 0$. При вращении согласно уравнениям (3.132) в обмотке статора w_β^s , расположенной под углом 90°

к w_α^s , будет наводиться синусоидальное напряжение, пропорциональное ω_p .

Для тахогенератора важно, чтобы напряжение линейно зависело от ω_p , а его фаза и форма не изменились при изменении частоты вращения. Иными словами, амплитудные и фазовые погрешности

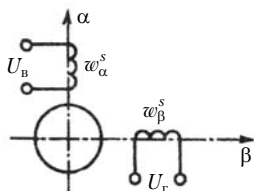


Рис. 3.109. Асинхронный тахогенератор

в асинхронных тахогенераторах должны быть минимальными. Для уменьшения погрешностей следует делать ротор с повышенным сопротивлением, а нагрузка, подключаемая к напряжению U_r , должна быть высокоомной. При этом $U_r \approx E_r$ и ток в выходной обмотке не влияют на характеристики асинхронного тахогенератора.

Одним из важных показателей тахогенератора является крутизна выходной характеристики

$$k = \frac{\Delta U_r}{\Delta n}, \quad (3.149)$$

где ΔU_r — изменение выходного напряжения; Δn — изменение частоты вращения.

Чем больше крутизна выходной характеристики, тем точнее будет работать система автоматического управления. Однако увеличение крутизны выходной характеристики без увеличения габаритов тахогенератора влечет увеличение амплитудной и фазовой погрешностей. Поэтому при проектировании тахогенераторов приходится увязывать крутизну выходной характеристики с погрешностями. У точных асинхронных тахогенераторов $k = 1 \div 3$ мВ/(об/мин), а у тахогенераторов следящих систем $k = 6 \div 10$ мВ/(об/мин).

При питании обмотки возбуждения w_a^s постоянным током при постоянной частоте вращения напряжение U_r будет равно нулю, а при наличии ускорения dn/dt ЭДС на обмотке w_β^s изменяется согласно уравнениям (3.132) пропорционально ускорению. В этом режиме асинхронный тахогенератор является датчиком ускорения.

В системах синхронной связи и для преобразования угла поворота в электрический сигнал применяются сельсины и поворотные (вращающиеся) трансформаторы.

Трехфазные сельсины конструктивно не отличаются от асинхронных машин с фазным ротором. В однофазных сельсинах имеется однофазная обмотка возбуждения и трехфазная обмотка синхронизации. Поворотные трансформаторы — двухфазные асинхронные двигатели с фазной обмоткой на роторе, выведенной на кольца. Так как сельсины и поворотные трансформаторы выполняют функции датчиков и приемников в устройствах автоматического управления, при проектировании их основное внимание должно быть уделено вопросам точности и надежности.

Сельсины применяют в системах синхронной связи двух видов: синхронного поворота (передачи угла) и синхронного вращения (электрического вала).

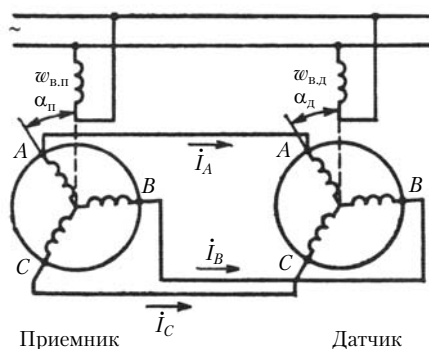


Рис. 3.110. Схема индикаторной синхронной связи

Системы передачи угла в свою очередь можно разделить на индикаторные системы синхронной связи, в которых момент сопротивления на ведомой оси мал или отсутствует, и на трансформаторные системы синхронной связи, когда на ведомой оси имеется момент сопротивления.

На рис. 3.110 представлена схема индикаторной синхронной связи. Эта схема включает в себя два одинаковых однофазных сельсина и линию связи. Обмотки возбуждения сельсина-датчика $w_{в.д}$ и сельсина-приемника $w_{в.п}$ присоединены к одной сети, а концы фаз обмоток роторов сельсинов — обмотки синхронизации — через контактные кольца и линию связи соединены между собой. При повороте ротора сельсина-датчика на угол $\alpha_{д}$ ротор сельсина-приемника стремится повернуться на такой же угол. При $\alpha_{д} \neq \alpha_{п}$ возникают токи I_A, I_B, I_C , создающие момент в сельсине-приемнике и сельсине-датчике.

Уравнительный ток в фазах обмотки синхронизации определяется как

$$I_y = \frac{\Delta E}{2z_{\phi}}, \quad (3.150)$$

где ΔE — ЭДС, определяемая углом поворота сельсина-датчика; z_{ϕ} — сопротивление фазы сельсина (для датчика и приемника одинаковые).

В результате взаимодействия уравнительных токов с пульсирующим полем обмоток возбуждения сельсинов возникает синхронизирующий момент, который при изменении угла рассогласования изменяется по синусоидальному закону. Синхронизирующий момент приложен к сельсину-датчику и сельсину-приемнику.

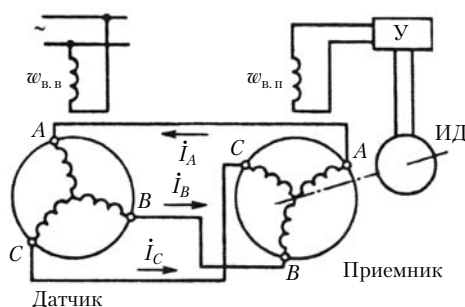


Рис. 3.111. Трансформаторная система связи

Трансформаторная система связи состоит из сельсина-датчика, сельсина-приемника, линии связи, усилителя $У$ и исполнительного двигателя ИД (рис. 3.111). Исполнительный двигатель соединен с нагрузочным механизмом, который имеет обратную механическую связь с сельсином-приемником. Обмотка возбуждения сельсина-датчика подключена к однофазной сети переменного тока и создает пульсирующее магнитное поле. Пульсирующее магнитное поле наводит в обмотке синхронизации датчика ЭДС, под действием которых в линии связи и обмотке синхронизации приемника постоянно протекают токи. Эти токи создают в сельсине-приемнике пульсирующее магнитное поле, направление которого зависит от взаимного расположения роторов приемника и датчика. Сцепляясь с обмоткой возбуждения приемника, это поле наводит ЭДС — выходное напряжение приемника. Последнее подается на усилитель, а затем на обмотку управления исполнительного двигателя, который отрабатывает заданный датчиком угол и возвращает ротор приемника в положение, при котором выходное напряжение становится равным нулю. Такое положение роторов сельсинов называется согласованным.

В целях повышения качества работы системы синхронной связи часто сельсины выполняются без скользящих контактов (рис. 3.112). Статор 1 бесконтактного сельсина практически не отличается от статора обычной асинхронной машины. В пазах статора располагается соединенная в звезду трехфазная обмотка синхронизации 6. Ротор 2 бесконтактного сельсина двухполюсный и разделен немагнитным промежутком 7 на две части. Однофазная обмотка возбуждения 5 выполняется в виде двух неподвижных кольцевых катушек, расположенных между лобовыми частями обмот-

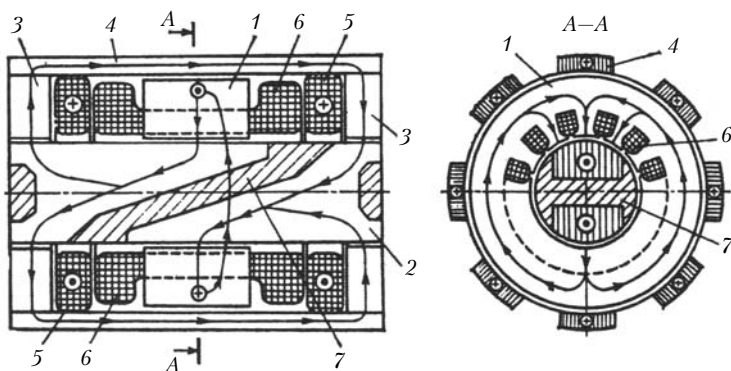


Рис. 3.112. Бесконтактный сельсин

ки статора и тороидами 3. Наружные цилиндрические поверхности тороидов связаны внешним магнитопроводом 4. Между внешним магнитопроводом и пакетом статора имеется немагнитный зазор. Путь магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения, показан на рис. 3.112. Потокосцепление обмотки возбуждения с той или иной фазой обмотки синхронизации зависит от положения ротора, так же как и в контактном сельсине.

Главным требованием к сельсинам, работающим в системах синхронной связи, является точность, которая характеризуется погрешностью

$$\Delta\theta = \frac{\theta_{\max 1} + \theta_{\max 2}}{2}, \quad (3.151)$$

где $\theta_{\max 1}$, $\theta_{\max 2}$ — максимальные положительное и отрицательное отклонения ротора приемника от ротора датчика при повороте на один оборот.

В зависимости от значения $\Delta\theta$ сельсины делят на четыре класса точности. Для первого класса $\Delta\theta$ не более ± 30 с, а для четвертого — не более ± 90 с.

Системы синхронного вращения заменяют механическое соединение двух или нескольких синхронно перемещающихся механизмов. Электрический вал применяется там, где необходимо иметь синхронное вращение механизмов, находящихся на большом удалении друг от друга, а механическое соединение нежелательно или невозможно. Электрический вал состоит из асинхронных машин с фазным ротором, контактные кольца которых соединены между собой (рис. 3.113). При рассогласовании роторов двигателей, так же как и в схеме

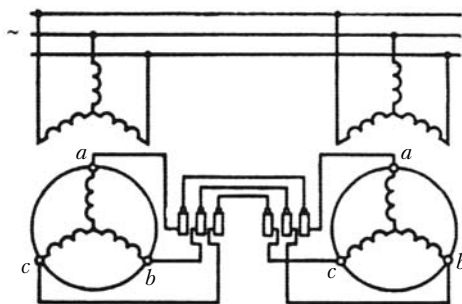


Рис. 3.113. Электрический вал

с сельсинами, возникают в статоре двигателей уравнивающие токи и электромагнитные моменты, возвращающие роторы в согласованное положение.

Поворотные (вращающиеся) трансформаторы применяются в системах автоматического управления для преобразования механического перемещения — угла поворота ротора в выходное напряжение. Конструктивно они представляют собой двухфазные двигатели с двухфазной обмоткой ротора, выведенной на контактные кольца. Особенностью их конструкции является тщательное выполнение магнитной системы и обмоток, в результате чего уменьшается число пространственных гармоник, что обеспечивает высокую точность поворотных трансформаторов.

Последние используются в качестве синусных поворотных трансформаторов, в которых $u = U_m \sin \alpha$; синусно-косинусных поворотных трансформаторов, в которых $u_A = U_m \sin \alpha$, $u_B = U_m \cos \alpha$; линейных поворотных трансформаторов, в которых $U = k \alpha$.

Поворотные трансформаторы также используются как построители и фазовращатели. Они могут заменять сельсины. Благодаря тому что поворотные трансформаторы — симметричные машины, в них достигается большая точность, чем в сельсинах.

Схема включения синусно-косинусного поворотного трансформатора показана на рис. 3.114. При повороте ротора поворотного трансформатора в обмотке *A* наводится ЭДС, изменяющаяся по закону синуса, а в обмотке *B* — по закону косинуса.

Если в поворотном трансформаторе используется одна обмотка на роторе, такой поворотный трансформатор называется синусным поворотным трансформатором.

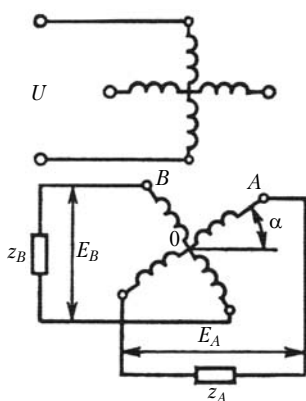


Рис. 3.114. Синусно-косинусный поворотный трансформатор

При определенном соединении обмоток и значении параметров обмоток можно в значительном диапазоне изменения угла получить линейное изменение $U = f(\alpha)$. Такие поворотные трансформаторы называются линейными поворотными трансформаторами.

По максимальной погрешности (отклонению от синусной или линейной зависимости от угла α и ряду других показателей) поворотные трансформаторы делят на шесть классов точности. В высокоточных поворотных трансформаторах погрешность не превышает нескольких секунд.

Особое место среди асинхронных машин, применяемых в системах автоматического управления, занимают электрические машины гироскопических систем. Они являются основой навигационных систем, с их помощью осуществляется стабилизация различных космических объектов.

Асинхронные гидродвигатели выполняются с короткозамкнутым ротором. Это — обращенные машины. Внешний ротор обеспечивает большой момент инерции, который определяет большую равномерность частоты вращения. Частота вращения в несколько десятков тысяч оборотов в минуту достигается за счет повышенной частоты напряжения питания — до 400—2000 Гц [2, 16].

3.22. Серии асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели выпускаются в виде единых серий, которые практически обеспечивают все основные потребности при комплектовании электроприводов для всех отраслей народного хозяйства и являются основными двигателями для большинства электроприводов. Они потребляют около половины вырабатываемой электроэнергии. При этом наибольшее количество электроэнергии потребляют двигатели мощностью до 10 кВт. Поэтому технико-экономические показатели двигателей единых серий, охватывающих этот диапазон мощностей, имеют важное значение для экономики страны [17].

Единая серия асинхронных двигателей 4А, которая выпускается с 1973 г., включает двигатели мощностью от 0,06 до 400 кВт. Стандартная шкала мощностей (см. табл. 3.1) применяется для всех модификаций двигателей. Двигатели мощностью от 0,06 до 0,37 кВт выполняются на напряжение 220/380 В, мощностью от 0,55 до 110 кВт — на напряжение 220/380 и 380/660 В, мощностью от 132 до 400 кВт на напряжение 380/660 В. Количество выводных концов шесть, соединение Δ/Y .

Помимо основного исполнения в серии 4А имеется целый ряд специализированных исполнений: тропическое, химическое, на частоту 60 Гц, сельскохозяйственное, текстильное и др. Выпускают двигатели с повышенным пусковым моментом, повышенным скольжением, малoshумные, многоскоростные и встраиваемые.

Выпускаются двигатели специализированные по конструкции: со встроенным электромагнитным тормозом, температурной защитой, встраиваемые, с повышенной точностью по установочным размерам, малoshумные, высокоточные.

В основном исполнении двигатели выполняются с короткозамкнутым ротором и предназначены для применения в условиях умеренного климата. Двигатели изготавливаются защищенными (1Р23) и закрытыми обдуваемыми (1Р44). Обозначение типов двигателей расшифровывается следующим образом: 4 — порядковый номер серии; А — асинхронный; Н — исполнение по способу защиты от окружающей среды (Н — защищенное, отсутствие буквы — закрытое обдуваемое); следующая буква — обозначение исполнения ротора (К — ротор фазный, отсутствие буквы — ротор короткозамкнутый); затем — исполнение двигателя по материалу станины и щитов (А — станина и щиты алюминиевые, отсутствие буквы — станина и щиты чугунные). Далее указывается высота центров, за ней установочный размер, число полюсов и климатическое исполнение и категория размещения.

Например, 4АА63А6УЗ — асинхронный двигатель серии 4А, закрытое обдуваемое исполнение со станиной и щитами из алюминия, с высотой оси вращения 63, магнитопровод первой длины шестиполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

Всего в серии 4А свыше сотни типоразмеров двигателей. Технические данные нескольких двигателей серии приводятся в табл. 3.4 лишь для общего представления об их технико-экономических показателях [17,19].

Таблица 3.4

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	КПД	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\min}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	Масса, кг
4AA56A2Y3	0,18	3000	0,66	0,76	2,2	2,0	1,2	5,0	4,5
4A1004Y3	4,0	1500	0,84	0,84	2,2	2,0	1,6	6,5	42
4A1804Y3	22,0	1500	0,90	0,90	2,2	1,4	1,0	7,0	175
4A250M6Y3	55,0	1000	0,91	0,89	2,0	1,2	1,0	7,0	535
4АН355M8Y3	200	750	0,94	0,86	1,9	1,0	0,9	5,5	1350

Серия 4А заменила серии асинхронных машин А2 и АО2, которые выпускались с 1960 г. В настоящее время двигатели этих серий выпускаются в небольших количествах.

С учетом технического прогресса мирового электромашиностроения в настоящее время выпускаются двигатели серии 5А. Планируется применение облегченных корпусов из высокопрочных алюминиевых сплавов. Для повышения КПД применяется сталь марки 2212, не требующая отжига после штамповки и имеющая меньшие удельные потери. Применение подшипников с постоянно заложенной смазкой и улучшенными акустическими характеристиками повышает надежность двигателей и снижает уровень шума.

В 1982 г. создана новая унифицированная серия асинхронных двигателей АИ, у которых по сравнению с серией 4А выше КПД, надежность, снижена материалоемкость, уменьшены шумы и вибрации.

Серии 4А, АК4, ДАЗ04 с высотами оси вращения 400 и 450 мм являются составной частью унифицированной серии Интерэлектро. Серии включают в себя 62 типа высоковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами мощностью от 200 до 1000 кВт, частотой вращения 3000–500 об/мин, со степенями защиты 1Р23 и 1Р44. В двигателях серии обеспечена высокая степень унификации, позволяющая получить различные модификации двигателей по назначению, способу охлаждения и защиты. Двигатели соответствуют высшей категории качества. Двигатели серии АН 14–18-го габаритов имеют диапазон мощностей от 200 до 2000 кВт при частотах вращения 250–1000 об/мин и напряжении 6 кВ. Электродвигатели с короткозамкнутым (серия АН) и с фазным ротором (серия АКН) имеют открытое исполнение.

Для работы в крановых и металлургических электроприводах выпускаются трехфазные асинхронные двигатели серий МТФ и МТКФ, МТН и МТКН. Крановые асинхронные двигатели серий МТФ и МТКФ характеризуются кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы и большими перегрузками. Металлургические двигатели серий МТН и МТКН предназначены для приводов металлургического производства, работающих при повышенных температурах. У электродвигателей серий МТФ и МТН фазный ротор, а серий МТКФ и МТКН — короткозамкнутый. Двигатели имеют кратность максимального момента, равную 2,3–3,2. Мощности двигателей от 1,4 до 37 кВт, напряжение сети 380/220 В.

В больших количествах асинхронные двигатели используются в бытовых приборах.

В табл. 3.5 представлены технико-экономические данные нескольких однофазных модификаций серии 4А, $f = 50$ Гц. Конденсаторные однофазные двигатели серии АКД выпускаются с пусковой и рабочей емкостью.

Таблица 3.5

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Напряжение, В	КПД	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	Емкость конденсатора, мкФ		Масса, кг
									$C_{\text{р}}$	$C_{\text{п}}$	
4АХУТ7182	750	2780	220	0,66	0,95	1,7	1,5	5,5	82	200	14,5
4ААЕ63В2	250	2760	220	0,62	0,75	1,7	0,8	8,5	39	60	6
4ААУ63В4	180	1380	220	0,47	0,65	1,5	1	4,5	33	40	6
4ААТ56А4	90	1390	220	0,53	0,9	1,6	0,4	4	12	50	4,5
4ААУ50А4	25	1370	220	0,23	0,51	1,6	2,2	2,5	6	10	3,0

Исполнение двигателей закрытое IP44 и по способу охлаждения — обдуваемое IСО 141, режим работы продолжительный, класс нагревостойкости двигателей В. Серия включает 64 типоразмера двигателей. Расшифровка названия двигателей: 4А — порядковый номер серии асинхронных двигателей, далее материал корпуса (А — алюминиевый сплав, Х — чугун), тип двигателя (Т — с рабочим конденсатором, УТ — с рабочим и пусковым конденсаторами, Е — с пусковой фазой).

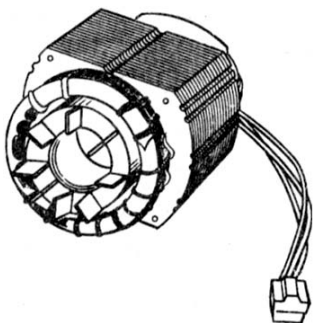


Рис. 3.115. Конденсаторный двигатель

Для привода бытовых приборов (звукозаписывающая аппаратура, перемотка ленты, контрольно-кассовые аппараты, центрифуга, фреоновый компрессор) применяются асинхронные конденсаторные двигатели серии КД. Эти двигатели выпускаются на напряжение 220 В, $f = 50$ Гц, мощности от 2,5 до 50 Вт, $\text{КПД} = 0,15 \div 0,6$, $\cos \varphi = 0,87 \div 0,95$, масса 0,75—2,4 кг (рис. 3.115).

Широко применяются двигатели общего назначения серий АОЛ, АВЕ. Серия АОЛ выпускается на мощности 30—400 Вт, АВЕ — на мощности 18—400 Вт.

Двигатели с повышенным активным сопротивлением в пусковой обмотке (рис. 3.116) используются в приводе герметичного компрессора бытовых холодильников. Эти двигатели предназначены для работы в среде хладона-12 и фреона-22 и рефрижераторного масла. Эти двигатели выпускаются на мощности от 60 до 150 Вт на 300 и 1500 об/мин, $\text{КПД} = 0,5 \div 0,7$, $\cos \varphi = 0,56 \div 0,62$. Расход активных материалов 0,027—0,057 кг/Вт.

Универсальные асинхронные двигатели серии УАД — трехфазные асинхронные двигатели с распределенной обмоткой на статоре. Они могут работать при включении в трех-

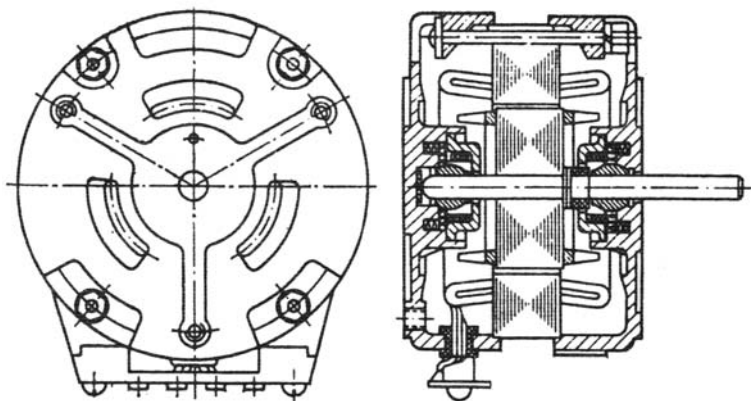


Рис. 3.116. Асинхронный микродвигатель

фазную сеть 220 В при соединении обмоток статора в звезду и от однофазной сети 220 В при включении рабочего конденсатора в свободную фазу сети.

Двигатели серии УАД имеют мощность от 1 до 70 Вт при напряжении 220 В и синхронной частоте вращения 1500 и 3000 об/мин. Это двигатели закрытого исполнения. Они предназначены для работы при температуре от -60 до $+85^{\circ}\text{C}$. Уровень звука на расстоянии 1 м от корпуса 45–70 дБ. Двигатели серии имеют семь типоразмеров, выполненных на четырех диаметрах статора. Технические данные микродвигателей серии УАД приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	КПД	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	Масса, кг
УАД-12	1	2750	0,10	0,7	2	0,5	2	0,25
УАД-42	10	2750	0,44	0,8	1,5	0,3	3,2	0,85
УАД-64	20	1280	0,40	0,5	1,5	1,5	3,0	1,5
УАД-74	30	1280	0,50	0,5	1,5	1,5	3,5	1,9

На частоту 400 Гц выпускаются асинхронные двигатели серии ДАТ. Серия включает двигатели на мощности от 10 до 10 000 Вт, напряжение 220 В и частоты вращения 10 800, 7500 и 5600 об/мин. Масса двигателей 0,15–12,5 кг. Режим работы двигателей продолжительный, температура окружающей среды от 60 до 100°C при пониженном атмосферном давлении [17].

Разработана единая унифицированная серия бытовых электродвигателей мощностью 0,6–180 Вт. В серии предусматривается прогрессивная технология, позволяющая автоматизировать большинство трудоемких процессов изготовления машин [1].

После распада СССР в России осталось примерно 30% мощностей заводов, изготавливающих асинхронные двигатели единых серий. Если в СССР электромашиностроительные заводы выпускали двигатели двух-трех высот вращения, что обеспечивало возможности высокой автоматизации процессов производства, то теперь на оставшихся заводах необходимо выпускать машины большинства габаритов.

Ярославский электромашиностроительный завод освоил выпуск серии RA — Российская асинхронная, охватыва-

ющая машины от 120 Вт до 100 кВт, соответствующие международным стандартам CENELEC и DIN [19].

Владимирский электромоторный завод выпускает серию асинхронных двигателей серии 5А и 5АМ до 1000 кВт.

На изготовление асинхронных двигателей идет наибольшее количество электротехнической стали и обмоточных проводов. Оптимальное проектирование и рациональная эксплуатация асинхронных двигателей имеют важное значение для народного хозяйства [11].

Глава 4

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. Режимы работы синхронных машин

В синхронных машинах угловая скорость ротора равна синхронной угловой скорости поля $\omega_p = \omega_c$. Из модели обобщенной электрической машины синхронные машины можно получить, если к обмоткам статора подвести переменные токи, а к обмоткам ротора — постоянный ток (см. рис. 1.25). Процессы преобразования энергии происходят так же, если в обмотках ротора протекают переменные токи, а на статоре находятся обмотки, в которых протекают постоянные токи. Такие машины называются обращенными. Обращенные машины находят меньшее применение, поскольку мощность возбуждения значительно меньше мощности машины и удобнее силовые обмотки располагать на неподвижной части.

Как и во всех электрических машинах, поля статора и ротора в синхронных машинах неподвижны относительно друг друга, а так как в обмотках ротора протекают постоянные токи ($f_2 = 0$), поля статора и ротора неподвижны относительно ротора.

Синхронные машины работают в трех режимах: генераторном, двигательном и в режиме синхронного компенсатора.

Наиболее распространенным режимом работы синхронных машин является генераторный режим. Без преувеличения можно сказать, что почти вся электрическая энергия на Земле вырабатывается синхронными машинами. Синхронные генераторы — самые мощные электрические машины, созданные человеком. На тепловых и атомных электростанциях эксплуатируются турбогенераторы мощностью 1200 МВт на 3000 об/мин и 1600 МВт на 1500 об/мин.

Турбогенераторы — неявнополюсные быстроходные электрические машины. Они имеют диаметр ротора 1,2—1,25 м и длину активной части статора около 7 м. В турбогенераторах достигнуты наивысший КПД для вращающихся машин, примерно равный 99%, и масса на единицу мощно-

сти, равная $0,456 \text{ кг}/(\text{кВ} \cdot \text{А})$. Гидрогенераторы — явнополюсные тихоходные электрические машины. Диаметр ротора Красноярского гидрогенератора мощностью 500 МВт равен 16,1 м, высота сердечника — 1,75 м, КПД — 98,2%. Масса Красноярского гидрогенератора 1650 т.

Основными на ТЭЦ в ближайшие годы будут турбогенераторы мощностью 300, 500 и 800 МВт.

Синхронные генераторы для дизель-генераторных установок имеют мощность от сотен до десятков тысяч киловатт. Выпуск автомобильных и тракторных генераторов мощностью сотни ватт и несколько киловатт достигает десятков миллионов штук в год.

В режиме двигателя синхронные машины используются в качестве приводных двигателей мощных насосов, вентиляторов, воздуходувок. Предельная мощность синхронных двигателей достигает нескольких сотен мегаватт.

Синхронные микродвигатели широко применяются в различных электроприводах. В больших количествах выпускаются двигатели, в которых для создания поля возбуждения применяются постоянные магниты. Синхронные двигатели мощностью в десятки киловатт выпускаются в небольших количествах из-за плохих пусковых свойств и склонности к качаниям.

Одним из основных достоинств синхронных машин является то, что они могут быть источниками реактивной мощности. Если асинхронные машины для создания поля потребляют из сети реактивную мощность, то синхронные машины в зависимости от степени возбуждения выдают в сеть или потребляют из сети реактивную мощность.

Синхронные машины, работающие в режиме генераторов или потребителей реактивной мощности, называются синхронными компенсаторами. Для повышения динамической устойчивости энергосистем и повышения качества электроэнергии необходимо выпускать синхронные компенсаторы примерно в таком же количестве, что и синхронные генераторы. Синхронные компенсаторы выполняются на базе явно- и неявнополюсных синхронных машин.

Как и все электрические машины, синхронные машины обратимы. В настоящее время для гидроаккумулирующих станций выпускаются гидроагрегаты, которые при избытке электроэнергии в системе работают в качестве насосов, закачивая воду из нижнего бьефа плотины в верхний, а при пиках нагрузки в системе — в качестве гидравлической тур-

бины, которая вращает генератор, вырабатывающий электроэнергию. В этом случае одна и та же синхронная машина используется в генераторном и двигательном режимах.

Как правило, синхронные генераторы и двигатели эксплуатируются с $\cos \varphi = 0,8 \div 0,9$. При этом реактивная энергия поступает в сеть, если синхронная машина работает при перевозбуждении.

Турбогенераторы выполняются с горизонтальным валом на частоту вращения 3000 и 1500 об/мин. Гидрогенераторы — тихоходные машины, как правило, с вертикальной осью вращения. Гидравлическая турбина располагается под гидрогенератором и соединяется с ним фланцевым соединением. Гидрогенераторы по габаритам значительно больше турбогенераторов. Конструктивные части гидрогенератора занимают большой объем. Опорный подшипник воспринимает массу ротора, гидравлической турбины и напор столба воды. Так, сила давления на подпятник в гидрогенераторе, имеющем мощность 225 МВт, составляет $3,5 \cdot 10^7$ Н. Вместе с гидравлической турбиной высота агрегата составляет 25—30 м.

Первые городские и районные электростанции появились в начале XX в. Паровая турбина была соединена с турбогенератором в 1899 г.

После революции выработка электроэнергии в СССР увеличилась в 1000 раз. Такой рост производства электроэнергии был обеспечен за счет роста единичной мощности турбо- и гидрогенераторов.

Мощность турбогенераторов за последние 30—40 лет практически в тех же габаритах увеличилась в 10 раз. Это одно из самых крупных научных достижений второй половины XX в. Это увеличение мощности было достигнуто за счет форсированного охлаждения машин. Применение внутреннего водяного охлаждения обмоток и магнитопровода позволяет довести мощность турбогенераторов до значений свыше 2000 МВт.

В 1923 г. завод «Электросила» выпустил для Волховской ГЭС гидрогенератор мощностью 7 МВт и частотой вращения 75 об/мин. На Днепрогэсе в 1934 г. были установлены гидрогенераторы мощностью 63 МВт и частотой вращения 88,2 об/мин. После войны для волжских ГЭС были построены гидрогенераторы мощностью 125 МВт и частотой вращения 68,2 об/мин. Братские гидрогенераторы, выпущенные в 1950-х гг., имеют мощность 225 МВт и частоту вращения

125 об/мин. Красноярская машина разработки 1960-х гг. имеет мощность 500 МВт и частоту вращения 93,8 об/мин; генераторы на восстанавливаемой Саяно-Шушенской ГЭС — одни из самых мощных в мире — 640 МВт (720 МВ·А) при частоте вращения 142,8 об/мин.

В ближайшие годы будут созданы еще более мощные гидрогенераторы. Предельная мощность гидрогенераторов лимитируется мощностью гидроэлектростанций.

Синхронные машины благодаря их преимуществам перед асинхронными находят новые применения, и их выпуск и области применения с каждым годом расширяются.

Согласно ГОСТу 183—74 (2001) и стандартам на турбо-, гидрогенераторы и синхронные компенсаторы к числу номинальных данных, выбиваемых на табличке, укрепленной на корпусе машины, относятся:

- номинальная мощность (для генераторов и компенсаторов — полная мощность в киловольт-амперах, для двигателей — мощность на валу в киловаттах);
- номинальный коэффициент мощности (при перевозбуждении);
- номинальный КПД (для двигателей);
- схема соединений обмоток;
- номинальное (линейное) напряжение, В;
- частота вращения, об/мин (для гидрогенераторов указывается и угонная частота вращения);
- частота тока якоря, Гц;
- номинальный линейный ток якоря, А;
- номинальные напряжения и ток обмотки возбуждения.

На щитке указывается также завод — изготовитель машины и год выпуска.

4.2. Процессы преобразования энергии в синхронных машинах

Схема неявнополюсной синхронной машины основного исполнения представлена на рис. 4.1, *а*. Обмотка якоря 1 расположена в пазах статора, а обмотка возбуждения 2 — на роторе. Демпферной обмоткой являются пазовые клинья и стальной массивный ротор 3. Мощность возбуждения составляет несколько процентов мощности машины, поэтому в этом исполнении щеточный аппарат работает надежно, а так как в обмотке возбуждения протекает постоянный ток, для его подвода требуются два кольца и две щетки.

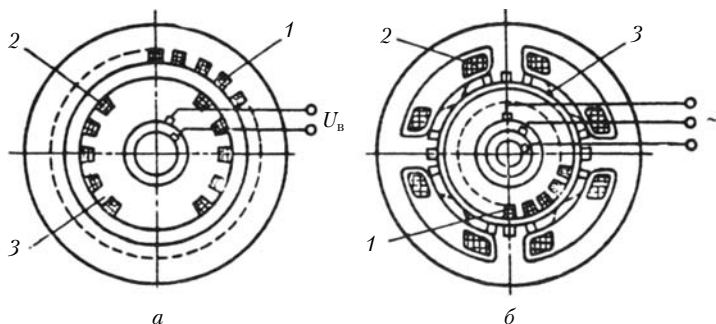


Рис. 4.1. Основные конструктивные схемы выполнения синхронных машин

В обращенной конструкции (рис. 4.1, б) обмотка якоря 1 расположена на вращающейся части, а обмотка возбуждения 2 — на статоре. Демпферная обмотка 3, представляющая собой медные сварные шины, укладывается в пазах полюсных наконечников и создает короткозамкнутые контуры в продольной и поперечной осях машины. Для наглядности обращенная конструкция дана в виде явнополюсной конструкции, которая в таком исполнении более распространена. Недостатком обращенной конструкции является наличие щеточного аппарата, рассчитываемого на полную мощность машины. В крупных синхронных генераторах обращенная конструкция не применяется из-за невозможности выполнения токосъемного устройства.

Простейшую модель синхронной машины можно получить из модели обобщенной машины, если $\omega_p = \omega_c$. Синхронные машины имеют на роторе демпферную обмотку и обмотку возбуждения. Поэтому синхронную машину без учета вихревых токов необходимо рассматривать как машину с одной обмоткой на статоре и двумя обмотками на роторе. На рис. 4.2 приняты обозначения: w_d и w_q — обмотки якоря по осям d и q , u_d и u_q — напряжения, приложенные к этим обмоткам; $w_{d\delta}$, w_{dq} — демпферные обмотки по осям d и q (обычно это короткозамкнутые обмотки и напряжения на них равны нулю); $w_{\delta d}$ и $w_{\delta q}$ — обмотки возбуждения; u_f — напряжение обмотки возбуждения.

Обмотка возбуждения в синхронных машинах выполняется по одной, как правило, продольной оси. При расположении витков по одной оси достигается экономия меди, а процессы преобразования энергии в машине не изменяются.

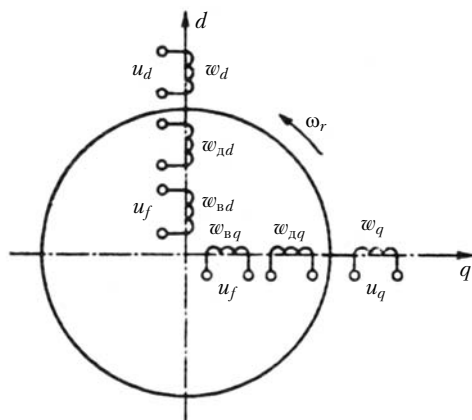


Рис. 4.2. Модель синхронной машины

Чтобы в уравнениях было меньше членов, содержащих ЭДС вращения, удобнее рассматривать обращенную машину с вращающейся обмоткой якоря (рис. 4.3). Процессы электрохимического преобразования энергии происходят в воздушном зазоре, поэтому они не изменяются от того, вращаются или неподвижны обмотки. Важно относительное перемещение обмоток.

При составлении уравнений синхронных машин удобнее записывать их в системе координат d, q , связанных с обмотками ротора. Наблюдатель, располагаясь на роторе машины, «видит» в воздушном зазоре неподвижное относительно

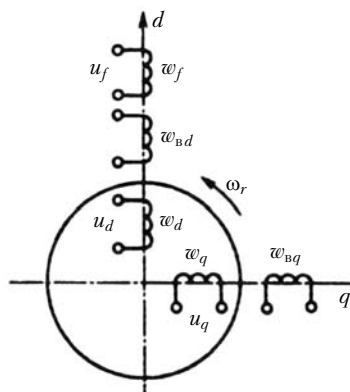


Рис. 4.3. Модель обращенной синхронной машины

ротора магнитное поле, созданное переменными токами обмоток статора. Картина не изменится, если остановить ротор и магнитное поле. Чтобы в заторможенной машине токи остались теми же, что и во вращающейся машине, надо ввести ЭДС вращения в обмотки якоря, а частоту токов сделать равной нулю. Система координат d, q для синхронных машин удобна, так как моделирование осуществляется на постоянном токе.

Для схемы синхронной машины с приведенными обмотками (см. рис. 4.3) может быть записана следующая система уравнений напряжений:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q\omega_p + r_a i_d, \\ u_q = \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d\omega_p + r_a i_q, \\ u_f = \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f, \\ 0 = \frac{d\Psi_{\text{дd}}}{dt} + r_{\text{дd}} i_{\text{дd}}, \\ 0 = \frac{d\Psi_{\text{дq}}}{dt} + r_{\text{дq}} i_{\text{дq}}, \end{cases} \quad (4.1)$$

где r_a — активное сопротивление обмотки якоря; r_f — активное сопротивление обмотки возбуждения; $r_{\text{дd}}$, $r_{\text{дq}}$ — активные сопротивления демпферной обмотки по осям d и q ; i_d и i_q — токи в обмотках якоря по продольной и поперечной осям; i_f — ток в обмотке возбуждения; $i_{\text{дd}}$ и $i_{\text{дq}}$ — токи в демпферной обмотке по продольной и поперечной осям машины; $\omega_p = \omega_c$ — угловая скорость ротора.

Потокосцепления обмоток в уравнениях (4.1) определяются в виде

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + M_{ad} i_f + M_{ad} i_{\text{дd}}, \\ \Psi_q = L_q i_q + M_{aq} i_{\text{дq}}, \\ \Psi_f = L_f i_f + M_{ad} i_d + M_{ad} i_{\text{дd}}, \\ \Psi_{\text{дd}} = L_{\text{дd}} i_{\text{дd}} + M_{ad} i_d + M_{ad} i_f, \\ \Psi_{\text{дq}} = L_{\text{дq}} i_{\text{дd}} + M_{aq} i_q. \end{cases} \quad (4.2)$$

Здесь L_d , L_q — индуктивности обмоток якоря по продольной и поперечной осям машины; L_f — индуктивность обмотки возбуждения; $L_{\text{дd}}$ и $L_{\text{дq}}$ — индуктивности демпферной обмотки по продольной и поперечной осям машины; M_{ad} , M_{aq} — взаимные индуктивности между обмотками по продольной и поперечной осям.

Как и во всех машинах, полная индуктивность равна сумме взаимной индуктивности и индуктивности рассеяния; $L = M + L_\sigma$. При этом предполагается, что есть общий поток по продольной и поперечной осям машины, сцепленный со всеми обмотками, и у каждой обмотки есть потоки рассеяния, сцепленные только с одной обмоткой.

Электромагнитный момент определяется через токи

$$M_{\text{эм}} = M(i_f i_q + i_q i_{\text{дd}} - i_d i_{\text{дq}}), \quad (4.3)$$

где $M = M_{ad} = M_{aq}$, что имеет место в неявнополюсной машине.

Через потокосцепления и токи электромагнитный момент определяется следующим образом:

$$M_{эм} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d. \quad (4.4)$$

При определении момента для явнополюсной машины необходимо учитывать реактивный момент, который появляется за счет различия магнитных проводимостей в продольной и поперечной осях.

Совокупность уравнений напряжений (4.1) и уравнения момента (4.3) или (4.4) описывает процессы электромагнитического преобразования энергии в синхронных машинах.

Уравнения синхронной машины можно преобразовать, подставив в уравнения (4.1) значения потокосцеплений (4.2):

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_{\lambda d} - L_q i_q \omega_p - M_{aq} i_{\lambda q} \omega_p + r_a i_d, \\ u_q = L_q \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_{\lambda q} + L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p + M_{ad} i_{\lambda q} \omega_p + r_a i_q, \\ u_f = L_f \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_{\lambda d} + r_f i_f, \\ 0 = L_{\lambda d} \frac{d}{dt} i_{\lambda d} + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f + r_{\lambda d} i_{\lambda d}, \\ 0 = L_{\lambda q} \frac{d}{dt} i_{\lambda q} + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + r_{\lambda q} i_{\lambda q}. \end{cases} \quad (4.5)$$

Уравнения (4.5) синхронной машины сложнее уравнений асинхронной машины. Их можно упростить, если рассматривать синхронную машину без демпферной обмотки. Демпферная обмотка в установившемся режиме влияет на качания, демпфируя колебания ротора. Без учета демпферной обмотки уравнения (4.5) имеют вид

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f - L_q i_q \omega_p + r_a i_d, \\ u_q = L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p + r_a i_q, \\ u_f = L_f \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + r_f i_f. \end{cases} \quad (4.6)$$

В уравнениях (4.6)

$$L_d = M_{ad} + L_{\sigma d}, \quad L_q = M_{aq} + L_{\sigma q}, \quad L_f = M_{ad} + L_{\sigma f}, \quad (4.7)$$

где $L_{\sigma d}$, $L_{\sigma q}$ и $L_{\sigma f}$ — индуктивности рассеяния обмотки якоря по продольной и поперечной осям машины и индуктивность рассеяния обмотки возбуждения.

С учетом выражений (4.7) уравнения (4.6) можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} u_d = L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f - L_q i_q \omega_p + r_a i_d, \\ u_q = L_{\sigma q} \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p + r_a i_q, \\ u_f = L_{\sigma f} \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) + r_f i_f. \end{cases}$$

Представив ЭДС вращения в поперечной и продольной осях

$$E_q = L_q i_q \omega_p; \quad E_d = L_d i_d \omega_p + M_{ad} i_f \omega_p,$$

получим

$$\begin{cases} u_d = L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) - E_q + r_a i_d, \\ u_q = L_{\sigma q} \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + E_d + r_a i_q, \\ u_f = L_{\sigma f} \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) + r_a i_d. \end{cases} \quad (4.8)$$

Полученные уравнения описывают переходные и установившиеся процессы в синхронной машине без учета демпферной обмотки.

Вводить в уравнения (4.8) замену переменных $i_f + i_d = i$ не имеет смысла, так как в установившихся режимах ток возбуждения в синхронных машинах не зависит от нагрузки и изменяется по произвольному закону. Уравнения (4.8) больше упростить не удастся, а при исследовании динамики следует работать с уравнениями (4.5) или (4.8).

Чтобы получить из дифференциальных уравнений синхронной машины уравнения для установившегося режима, необходимо в уравнения (4.8), так же как это выполнялось для трансформаторов и асинхронных машин, заменить оператор дифференцирования $\frac{d}{dt} \rightleftharpoons j\omega$.

Без учета демпферной обмотки и с учетом того, что в обмотке возбуждения протекает постоянный ток, уравнения для установившегося режима из системы (4.5) имеют вид

$$\begin{cases} \dot{U}_d = j\omega L_{\sigma d} \dot{I}_d + j\omega M_{ad} \dot{I}_d - \dot{E}_q + r_a \dot{I}_d, \\ \dot{U}_q = j\omega L_{\sigma q} \dot{I}_q + j\omega M_{aq} \dot{I}_q + \dot{E}_d + r_a \dot{I}_q. \end{cases}$$

Так как сопротивление в продольной оси

$$x_d = \omega L_{\sigma d} + \omega M_{ad},$$

а сопротивление в поперечной оси

$$x_q = \omega L_{\sigma q} + \omega M_{aq},$$

получим

$$\begin{cases} \dot{U}_d = jx_d \dot{I}_d - \dot{E}_q + r_a \dot{I}_d, \\ \dot{U}_q = jx_q \dot{I}_q + \dot{E}_d + r_a \dot{I}_q. \end{cases} \quad (4.9)$$

Уравнение для контура возбуждения, в котором протекает постоянный ток, с учетом только активного сопротивления обмотки возбуждения

$$u_f = I_f r_f. \quad (4.10)$$

Уравнения (4.9) и (4.10) описывают процессы электро-механического преобразования энергии в синхронной машине в установившемся режиме.

Два уравнения (4.9) можно свести к одному уравнению, обратившись к понятиям результирующих векторов напряжений, токов, потокосцеплений, МДС и потока. Самая простая векторная диаграмма синхронной неявнополюсной машины — диаграмма Потье — может быть получена, если машину представить в виде четырехполюсника с двумя механическими и двумя электрическими выводами (рис. 4.4). Представим внутреннее сопротивление синхронной машины $z_c = r_a + jx_c$ состоящим из активного сопротивления r_a и индуктивного сопротивления $x_c = x_{\sigma a} + x_{ad}$, где $x_{\sigma a}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря; x_{ad} — индуктивное сопротивление реакции якоря. Тогда векторная диаграмма для фазы обмотки якоря синхронного генератора будет выглядеть так, как показано на рис. 4.5. На векторной диаграмме \dot{E}_0 (\dot{E}_d в системе (4.9)) — напряжение фазы при холостом ходе, \dot{U} — напряжение фазы при нагрузке, соответствующей току \dot{I} и определенному $\cos \varphi$. Падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины $\dot{I} z_c$ определяется падением напряжения на активном сопротивлении обмотки яко-

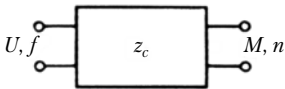


Рис. 4.4. Синхронная машина как четырех-полюсник

ря r_a и индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки якоря $x_{\sigma a}$ и реакцией якоря $\dot{I}x_{ad}$.

Вся сложность процессов преобразования энергии в синхронной машине при простейшем математическом описании сводится к сложной зависимости коэффициента x_{ad} от тока \dot{I} . Сопротивление x_{ad} зависит от геометрии машины, насыщения, реакции якоря и характера нагрузки. Эти сложные связи рассмотрим после изучения конструкции синхронных машин.

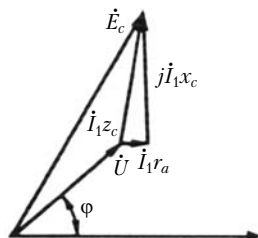


Рис. 4.5. Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины

4.3. Конструкции синхронных машин

Конструкция мощных синхронных машин в первую очередь определяется частотой вращения. Неявнополюсные синхронные машины — турбогенераторы изготавливаются с частотой вращения 3000 об/мин в двухполюсном исполнении ($p = 1$) и 1500 об/мин в четырехполюсном исполнении ($p = 2$). В синхронных машинах с большим числом полюсов — гидрогенераторах — применяется явнополюсная конструкция ротора.

На рис. 4.6 представлен разрез турбогенератора ТВВ-200-2 ЛПЭО «Электросила», мощность 200 000 кВт, на напряжение 20 кВ, $\cos \varphi = 0,85$. Турбоагрегат состоит из нескольких машин, соединенных между собой муфтами. Ротор турбогенератора соединяется муфтой с ротором паровой турбины. Таким образом, получается единый блок паровая турбина — турбогенератор.

Ротор турбогенератора изготавливается из цельных поковок специальной стали, обеспечивающей хорошие магнитные характеристики и механическую прочность при всех режимах работы турбогенератора. Ротор состоит из утолщенной части — бочки ротора и хвостовиков. На роторе находятся контактные кольца, с помощью которых на ротор подается постоянный ток. На роторе укреплен также центробежный вентилятор для охлаждения лобовых частей обмотки возбуждения. Лобовые части обмотки возбуждения закрепляются бандажами из прочной немагнитной стали.

На наружной поверхности бочки ротора (рис. 4.7) фрезеруются пазы прямоугольной или трапецеидальной формы 1, в которые укладывается распределенная обмотка возбуждения. Обмотка занимает примерно $2/3$ поверхности ротора. Оставшаяся часть зубцовой зоны образует большие зубцы магнитопровода 2. На больших зубцах могут располагаться пазы без обмотки или в этой зоне пазы не фрезеруются.

Обмотка ротора состоит из группы катушек различной длины и ширины. Катушки наматывают полосовой медью. В крупных турбогенераторах применяют медь, легированную серебром, обладающую повышенной механической прочностью. Схема соединений катушек ротора показана на рис. 4.8.

Выполнение обмотки ротора зависит от системы охлаждения. В турбогенераторах применяется косвенное охлаждение, непосредственное внутреннее охлаждение водородом или водой. При непосредственном внутреннем охлаждении проводники имеют внутренние каналы, по которым проходит водород или вода. Тепло от меди отбирается непосредственно водородом или водой и отводится из активной зо-

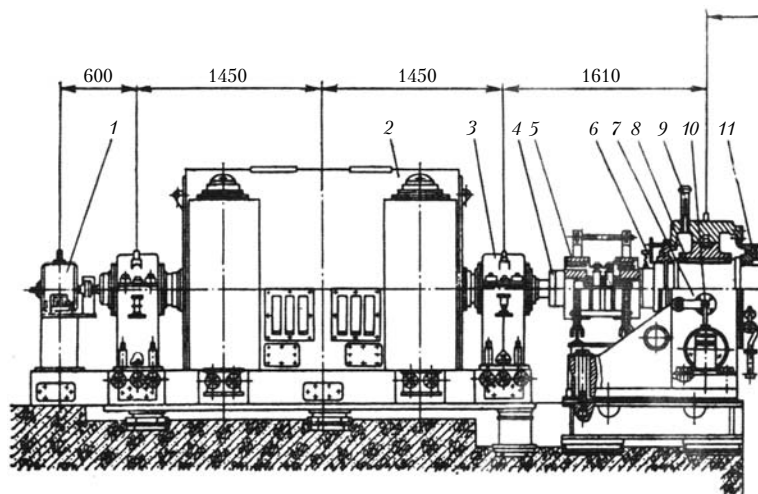


Рис. 4.6. Турбогенератор ТБВ-200-2:

1 — тахогенератор; 2 — возбудитель; 3 — подшипник; 4 — муфта; 5 — контактные кольца; 6 — токосъемник вала; 7 — корпус подшипника; 8 — вкладыш; 9 — термометр на подшипнике; 10 — термометр на сливе масла; 11 — уплотнение вала; 12 — щит наружный; 13 — щит вентилятора; 14 — вентилятор; 15 — газоохладитель; 16 — статор; 17 — ротор; 18 — высоковольтные выводы; 19 — плиты фундаментальные; 20 — рым-лапы

ны машины. При косвенном охлаждении тепловая энергия проходит через изоляцию обмотки, а затем отдается стальным частям машины и водороду, заполняющему внутренний объем турбогенератора. В настоящее время косвенное охлаждение применяется в турбогенераторах мощностью до 100 МВт.

В турбогенераторах применяются в основном внутреннее водяное охлаждение обмоток статора и внутреннее водородное охлаждение обмоток ротора. С такой схемой охлаждения выпускаются турбогенераторы серии ТВВ вплоть до мощности 1200 МВт. Изготовлены и находятся в эксплуатации турбогенераторы с внутренним водяным охлаждением обмоток статора, ротора и магнитопровода.

При косвенном охлаждении секции обмотки ротора 1 (рис. 4.9, а) закрепляются в пазу клином 2 из дюралюминия повышенной прочности, стали или бронзы. Витковая изоляция 3 выполняется из миканитовых прокладок, закрепленных стеклотентой. Корпусной изоляцией 4 являются пазовые коробки из миканита или стеклянной ткани. Коробка имеет защитную оболочку из тонкого листа стали.

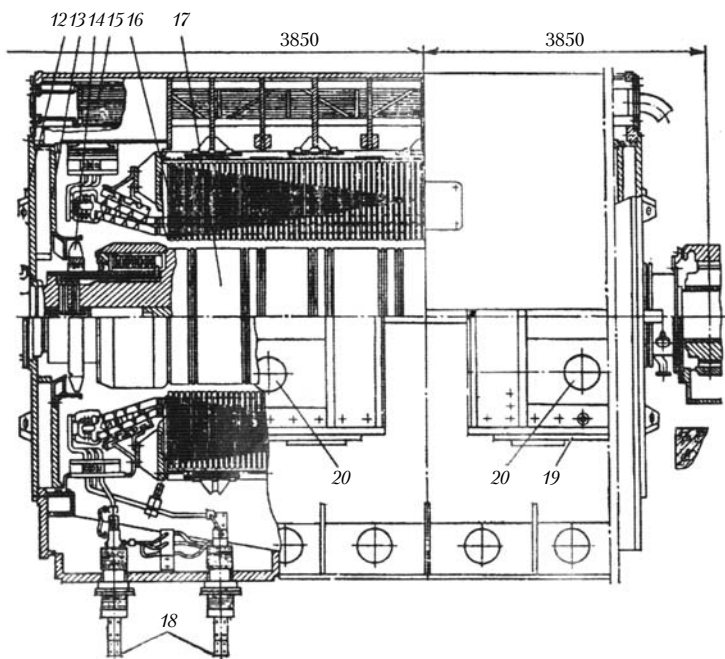


Рис. 4.6 (окончание)

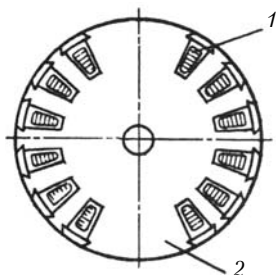


Рис. 4.7. Расположение пазов на роторе турбогенератора

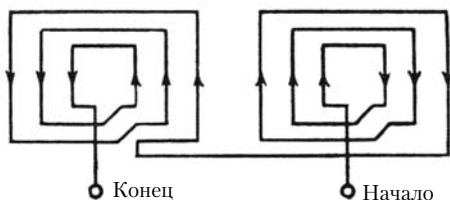


Рис. 4.8. Схема обмотки возбуждения

Перед заклиновкой обмотки в паз поверх коробки укладывается миканитовая прокладка 5.

При непосредственном водородном охлаждении витки обмотки возбуждения имеют каналы, а клинья выступают над бочкой ротора и имеют отверстия, через которые из зазора водород поступает в каналы обмотки и выбрасывается в зазор (рис. 4.9, б). В турбогенераторах с непосредственным водородным охлаждением витковая изоляция выполняется из стеклоткани, армированной снаружи стальной прокладкой. На дно паза укладывается стеклотекстолитовая прокладка с каналами для прохождения газа 6. Под клин устанавливается прокладка с каналами, через которые газ входит и выбрасывается из пазовой части.

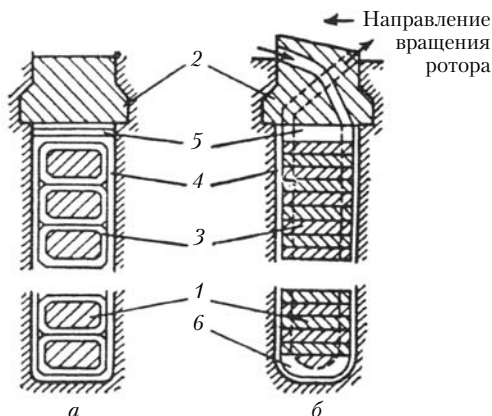


Рис. 4.9. Выполнение обмоток ротора при косвенном (а) и непосредственном внутреннем (б) охлаждении

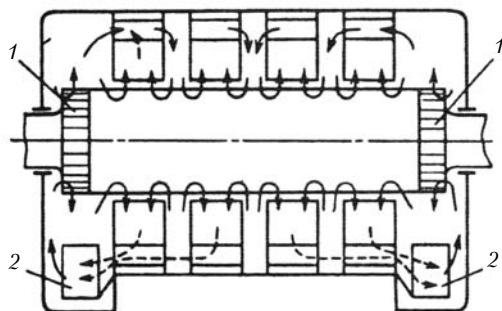


Рис. 4.10. Схема многоструйной радиальной системы охлаждения

Циркуляция водорода внутри машины осуществляется за счет забора водорода в зоне впуска газа и выброса его в горячей зоне. Газ направляется заборниками внутрь обмотки и, пройдя до дна паза по наклонным каналам, снова выбрасывается в зазор. Многоструйная радиальная система непосредственного охлаждения магнитопровода статора и обмотки ротора водородом, совмещенная с жидкостным непосредственным охлаждением обмотки статора, позволяет разрабатывать турбогенераторы предельной мощности (рис. 4.10). Лобовые части обмотки статора дополнительно охлаждаются вентиляторами 1, помещенными на роторе. Горячий газ охлаждается в воздухоохладителях 2.

Лобовые части обмотки ротора испытывают большие напряжения, их надежное крепление имеет важное значение для надежной работы турбогенератора. Крепление лобовых частей обмотки ротора 1 показано на рис. 4.11. Роторные немагнитные бандажные кольца 2 насажены на полуэластич-

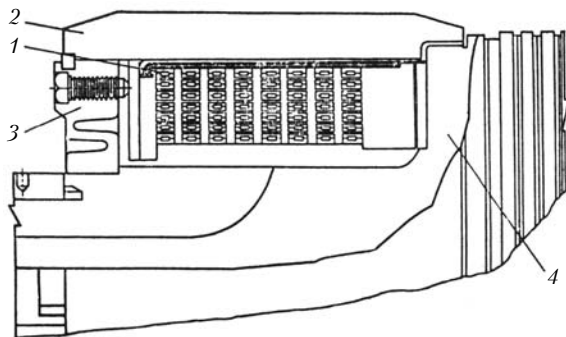


Рис. 4.11. Лобовые части обмотки ротора

ные центрирующие кольца 3 и центрирующие заточки 4 на бочке ротора. Между бандажами и заточкой на бочке ротора установлена изоляция, препятствующая замыканию токов, которые наводятся на поверхности бочки ротора во время несимметричных режимов работы генератора. Опрессовка лобовых частей и заклиновка ротора производятся специальными гидравлическими приспособлениями.

Ток возбуждения подается токоподводящим устройством, состоящим из траверсы с несколькими десятками щеткодержателей и щеток. Щетки скользят по контактным кольцам со спиральными канавками. Спиральные канавки предназначены для срыва воздушного клина между кольцами и щетками. Охлаждение контактных колец и щеточного аппарата турбогенераторов мощностью до 300 000 кВт осуществляется самовентиляцией через аксиальные отверстия в кольцах. В турбогенераторах большой мощности охлаждение контактных колец и щеточного аппарата осуществляется центробежными вентиляторами, насаженными на вал ротора.

После сборки ротор подвергают динамической балансировке. Ротор испытывают при повышенной частоте вращения в специальной разгонобалансировочной установке.

Статор турбогенератора состоит из сердечника — магнитопровода с прямоугольными пазами, двухслойной обмотки и корпуса, в котором помещается сердечник с обмоткой. Сердечник статора собирают из листов электротехнической стали. Вдоль оси статор разделен вентиляционными каналами. Крайние пакеты сердечника статора укреплены нажимными плитами.

Обмотка статора — трехфазная, двухслойная стержневая с транспозицией проводников. В турбогенераторах мощностью свыше 500 МВт применяется шестифазная обмотка. Изоляция стержней обмотки статора выполняется или из микаленты, компаундированной изоляционными лаками, или из терморезистивной изоляции типа слюдотерм. Изоляция типа слюдотерм изготавливается из предварительно пропитанных эпоксидными составами стеклослюдинитовых лент. Весь процесс изготовления изоляции, состоящий из наложения, опрессовки и запечки, механизирован. Изоляция слюдотерм обладает высокими изоляционными и механическими свойствами, что обеспечивает надежность машин в эксплуатации.

Напряжение на обмотке статора турбогенераторов мощностью 800—1200 МВт — 20÷24 кВ.

Корпуса статоров — сварные, газонепроницаемые, в турбогенераторах мощностью до 200 МВт — неразъемные. Корпуса турбогенераторов мощностью 300 МВт и выше — разъемные в поперечном направлении.

Для уменьшения передачи на корпус и фундамент 100-периодных колебаний сердечников в турбогенераторах 150 МВт и выше обеспечивается упругая связь сердечника с корпусом статора.

Обмотка статора турбогенераторов мощностью свыше 200 МВт имеет внутреннее водяное охлаждение. Стержни обмотки имеют каналы, в которые через головки, расположенные в лобовых частях, дистиллированная вода поступает в обмотку.

Подача воды в токоведущие части осуществляется насосами, а отвод тепла от нагретой воды — теплообменными аппаратами. Вода проходит вакуумную обработку и очистку в соответствующих аппаратах. Предусматривается контроль за температурой, расходом, электрической проводимостью и давлением воды.

Система водородного охлаждения также замкнутая и снабжена системой контроля.

Система маслоснабжения обеспечивает непрерывную подачу масла в уплотнения вала. Система предусматривает очистку и охлаждение масла, а также автоматическое поддержание заданного перепада давлений между маслом и газом в уплотнениях вала турбогенератора. Масляные уплотнения обеспечивают надежную работу турбогенераторов при давлении водорода до $5 \cdot 10^5$ Па.

В турбогенераторах предусмотрен контроль температуры активной стали, обмотки статора, вкладышей уплотнений и подшипника, холодного и горячего газов, масла и воды. Приборы ведут непрерывную запись теплового состояния турбогенератора и возбuditеля, а также сигнализируют о превышении допустимых температур в контролируемых точках.

Явнополюсная конструкция ротора используется в мощных многополюсных синхронных машинах — гидрогенераторах. В настоящее время крупнейшими являются гидрогенераторы Красноярской ГЭС мощностью 500 МВт, $U = 15,75$ кВ, $n = 93,8$ об/мин, $\cos \varphi = 0,85$ и Саяно-Шушенской ГЭС мощностью 640 МВт, $U = 15,75$ кВ, $n = 142,5$ об/мин, $\cos \varphi = 0,85$.

Гидрогенераторы — машины индивидуального исполнения, имеющие большое многообразие конструктивных ре-

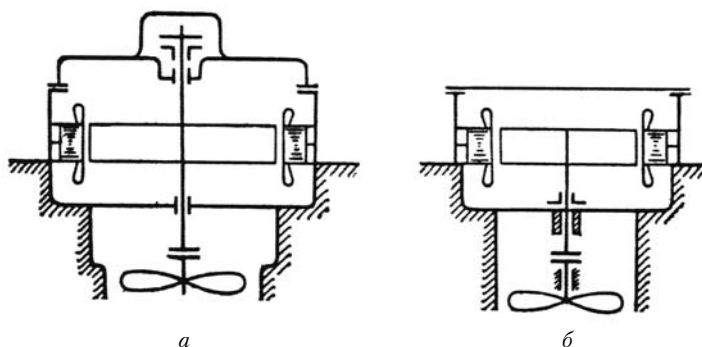


Рис. 4.12. Конструкции вертикальных гидрогенераторов подвешного (а) и зонтичного (б) типа

шений. Наибольшее распространение получили вертикальные гидрогенераторы подвешного типа, вертикальные гидрогенераторы зонтичного типа (рис. 4.12, а, б) и горизонтальные гидрогенераторы капсульного типа.

Вертикальные гидрогенераторы подвешного типа обычно применяются в высокоскоростных агрегатах. Такой тип машин обеспечивает большую механическую устойчивость работы агрегатов. Гидрогенераторы подвешного типа выполняются с одним направляющим подшипником, встроенным в верхнюю крестовину. Могут быть выполнены гидрогенераторы с двумя направляющими подшипниками. В этом случае устанавливается нижняя крестовина, в которую встраивается второй подшипник.

Самой мощной машиной подвешного типа является гидрогенератор для Братской ГЭС мощностью 225 МВт, $U = 15,7$ кВ, $n = 125$ об/мин, $\cos \varphi = 0,85$. Нагрузка на подпятник $1,4 \cdot 10^7$ Н.

Вертикальные гидрогенераторы зонтичного типа изготавливаются обычно для тихоходных гидроагрегатов. Этот тип машин экономичен и удобен при монтаже. В этой конструкции нет грузонесущей крестовины, а ее заменяет конусообразная опора для подпятника, устанавливаемая на крышке турбины. При этом снижаются высота и масса гидрогенератора.

Гидрогенераторы для Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС — зонтичного типа.

Предельная мощность гидрогенераторов лимитируется мощностью гидростанции. В Китае на реке Янцзы введена в эксплуатацию крупнейшая в мире ГЭС «Три ущелья» мощ-

ностью 18 200 МВт, на которой будут установлены 32 гидрогенератора по 700 МВт каждый.

Гидрогенераторы капсульного типа — малогабаритные герметизированные машины, работающие непосредственно в потоке воды. Они применяются на низконапорных русловых или приливных гидростанциях. Применение таких агрегатов позволяет получить экономию капиталовложений за счет упрощения гидротехнических сооружений.

В капсульных гидрогенераторах применяется система полного водяного охлаждения статора и ротора. Капсульные гидрогенераторы для Саратовской ГЭС имеют мощность 45 МВт, $U = 6,3$ кВ, $n = 75$ об/мин, $\cos \varphi = 0,85$, нагрузка на подпятник $0,75 \cdot 10^7$ Н. Капсульный гидрогенератор для Череповецкой ГЭС имеет мощность 20 МВт, $U = 3,15$ кВ, $n = 93,8$ об/мин, $\cos \varphi = 0,95$, нагрузка на подпятник $0,3 \cdot 10^7$ Н. Гидрогенераторы трехфазного напряжения выпускаются серий СВ — синхронные вертикальные гидрогенераторы с косвенным воздушным охлаждением обмоток статора и ротора; СВФ — синхронные вертикальные гидрогенераторы с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора и форсированным воздушным охлаждением обмотки ротора; СГКВ — синхронные горизонтальные капсульные гидрогенераторы с непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора водой.

На рис. 4.13 дан разрез гидрогенератора завода «Электросила» для ГЭС «Джердап — Железные ворота» (Румыния) мощностью 171 МВт, $n = 71,5$ об/мин, нагрузка на подпятник $3,5 \cdot 10^7$ Н.

Статор гидрогенератора 1 имеет диаметр несколько метров, поэтому собирается из сегментов. Сегменты выполняются из листов высоколегированной холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,35 и 0,5 мм. При шихтовке и опрессовке активной стали применяются специальные гидравлические прессы, создающие необходимое давление на сердечник.

На наружной поверхности листов имеются выемки, с помощью которых осуществляется крепление пакетов магнитопровода к корпусу статора 2. Для уменьшения реактивной мощности, необходимой для создания поля, листы одного слоя перекрываются листами другого слоя и, следовательно, как в трансформаторах, зазоры между листами перекрываются листами другого слоя.

Корпуса статоров гидрогенераторов сварные. В тихоходных машинах корпуса выполняются цилиндрическими,

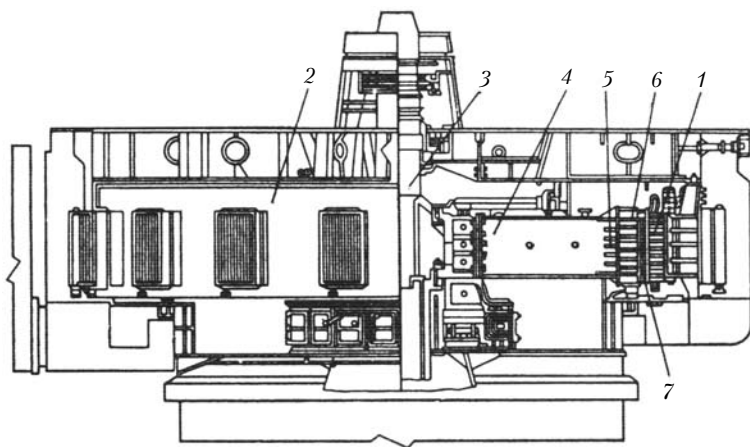


Рис. 4.13. Разрез гидрогенератора

а корпуса быстроходных машин — многогранные. В зависимости от габаритов машины для удобства транспортировки корпуса статоров делают разъемными на два — четыре — шесть — восемь секторов.

Пазы магнитопровода — открытые. В гидрогенераторах в основном применяется трехфазная двухслойная волновая стержневая обмотка. Для некоторых серий гидрогенераторов с водяным охлаждением статорной обмотки применяется однослойная стержневая обмотка. Стержни изготавливаются и чередующихся сплошных и полых элементарных проводников. Подвод и отвод воды к стержням осуществляется через специальные наконечники.

Для уменьшения добавочных потерь в катушечных обмотках транспонируются выводные концы катушек и межгрупповые соединения. В стержневых обмотках транспонируются элементарные проводники. На проводники обмотки статора при переходных процессах при пуске или коротких замыканиях действуют значительные усилия. Необходимо тщательное крепление лобовых частей обмоток. Лобовые части обмотки укрепляются с помощью дистанционных распорок и бандажных колец, к которым лобовые части крепятся прочным шнуром. В пазах стержни обмотки укрепляются клиньями из изоляционных материалов.

Для стержневых обмоток гидрогенераторов в последнее время применяется термореактивная изоляция типа слюдо-терм, монолит и т.п.

Ротор гидрогенератора (см. рис. 4.13) состоит из следующих основных частей: вала 3, остова ротора 4, обода ротора 5, сердечника полюса 6, катушки обмотки возбуждения 7 и демпферной обмотки.

Постоянный поток возбуждения замыкается в роторе по полюсам и ободу ротора. Полюсы могут выполняться массивными или шихтованными из листов стали, толщина которых определяется технологией изготовления и может составлять 1,5—3 мм. Обод (ярмо ротора) гидрогенераторов небольшого диаметра обычно выполняется массивным из стальной поковки, при больших диаметрах — из листового проката.

Катушка возбуждения 1 (рис. 4.14) надевается на сердечник полюса 2, который с помощью Т-образных хвостов 3 укрепляется на обode ротора 4. Крепление осуществляется двумя парами встречных стальных клиньев 5. Листы сердечника полюса стягиваются шпильками 6. На полюсных наконечниках имеются пазы, в которых расположены стержни демпферной обмотки 7. Стержни с торцов замыкаются сегментами, к которым привариваются стержни короткозамкнутой обмотки.

Обмотки возбуждения при косвенном воздушном охлаждении наматываются из медной полосы специального профиля с развитой поверхностью охлаждения. При форсированном воздушном охлаждении обмотка возбуждения выполняется из меди специального профиля с поперечными каналами. При водяном охлаждении катушка обмотки возбуждения изготавливается из полый меди, намотанной в несколько рядов.

Изоляция полюсов роторов крупных гидрогенераторов выполняется из отдельных элементов на основе слоистого пластика — стеклоасботекстолита с высокой нагревостойкостью и механической прочностью.

Во избежание деформаций в быстроходных машинах между полюсами устанавливаются распорки. Центробежные силы лобовых частей обмотки возбуждения воспринимаются козырьком нажимной щеки полюса, которая крепится

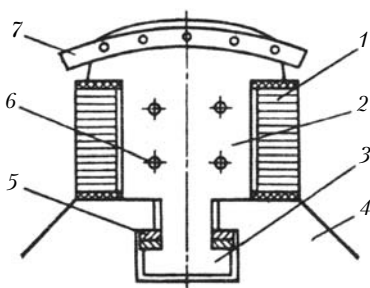


Рис. 4.14. Полюс статора гидрогенератора

с торца сердечника полюса и является крайним листом полюса.

Обод ротора крепится к остоу ротора. При больших диаметрах ротора применяются лучеобразные остовы с объемными спицами, имеющими двутавровое или коробчатое сечение. В быстроходных гидрогенераторах остовы роторов выполняются из кованных дисков, насаживаемых на вал с натягом, обеспечивающим передачу вращающего момента. Конструкция остова в виде сварного барабана, состоящего из втулки и дисков, применяется обычно при диаметрах ротора, не превосходящих 5 м.

Валы роторов гидрогенераторов изготавливаются из высоколегированной стали с повышенными механическими свойствами. Для обработки валов применяется станочное оборудование, позволяющее производить с высокой точностью обработку валов длиной до 20 м и диаметром до 4 м.

На роторе расположены контактные кольца. С помощью колец и щеток от возбuditеля на ротор подается постоянный ток. Возбудитель находится в верхней части гидрогенератора.

При сбросе нагрузки ротор гидрогенератора разгоняется до угонной скорости. Механическая прочность ротора рассчитывается по угонной скорости.

Подпятник является одним из важнейших узлов гидрогенератора. Подпятник воспринимает действующие на вал ротора вертикальные усилия, достигающие в мощных тихоходных гидрогенераторах $3,5 \cdot 10^7$ Н. Наиболее распространенным типом подпятника является подпятник с самоустанавливающимися сегментами. Подпятники имеют однорядное и двухрядное исполнение. Подпятники мощных гидрогенераторов изготавливаются двухрядными с балансирной связью между рядами сегментов (рис. 4.15).

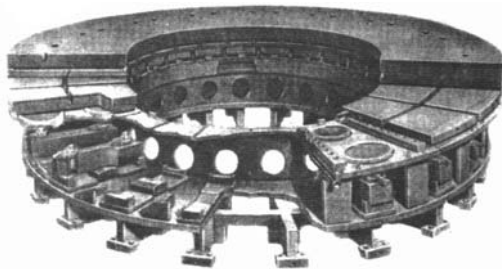


Рис. 4.15. Подпятник с самоустанавливающимися сегментами

Подпятники должны работать при жидкостном трении. Между трущимися поверхностями образуется масляная пленка толщиной 0,04—0,08 мм. Непременным условием образования жидкостного трения является самоустановка сегментов под некоторым углом к поверхности трения вращающегося диска. Клиновидный зазор между баббитовой поверхностью сегмента трения и зеркальной поверхностью вращающегося диска обеспечивает работу подпятника при жидкостном трении.

Сегменты и диск подпятника находятся в масляной ванне. Масло не только обеспечивает жидкостное трение в подпятнике, но и является охлаждающей средой. Для усиления охлаждения подпятника предусматриваются циркуляция масла и охлаждение его в маслоохладителях.

Радиальные усилия ротора воспринимаются направляющими подшипниками. В гидрогенераторах устанавливают один или два направляющих подшипника. Установка одного направляющего подшипника возможна благодаря жесткому фланцевому соединению валов гидрогенератора и турбины. Вторым направляющим подшипником является направляющий подшипник гидравлической турбины. Конструкция подшипников позволяет осуществлять регулировку сегментов при центровке агрегата.

Конструкция синхронных компенсаторов и мощных синхронных двигателей принципиально не отличается от конструкции неявнополюсных и явнополюсных синхронных генераторов. Конструкции двигателей небольшой мощности рассматриваются в параграфах 4.15 и 4.23.

4.4. Магнитное поле синхронной машины при холостом ходе

При холостом ходе ток в обмотке якоря равен нулю. Поле в воздушном зазоре создается током возбуждения, протекающим в обмотке возбуждения, при этом при вращении ротора в обмотке якоря наводится ЭДС.

При конструировании синхронных генераторов стремятся получить ЭДС, максимально приближающуюся к синусоиде. Несинусоидальность кривой напряжения оценивается коэффициентом искажения синусоидальности, который определяется отношением в процентах корня квадратного из суммы квадратов амплитуд высших гармоник данной кривой к амплитуде ее основной гармонической:

$$k = \frac{\sqrt{A_3^2 + A_5^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}, \quad (4.11)$$

где A_1, A_3, \dots, A_n — амплитуды 1-, 3- и n -й гармоник.

Коэффициент искажения для генераторов мощностью свыше 100 кВ·А должен быть не более 5%, а для генераторов от 1 до 100 кВ·А — не более 10%. Чтобы уменьшить несинусоидальность напряжения, необходимо максимально приблизить форму индукции поля возбуждения к синусоиде.

В явнополюсной машине поле возбуждения создается сосредоточенной катушечной обмоткой, и МДС $F = Iw_k$ (где I — ток в обмотке возбуждения, а w_k — число витков обмотки возбуждения) может быть принята изменяющейся по прямоугольному закону (рис. 4.16).

Поле в воздушном зазоре определяется МДС обмотки и проводимостью зазора. В явнополюсных синхронных машинах зазор неравномерный. Зазор под краем полюса $\delta_m \approx 1,6\delta$. Ширина полюсного наконечника $b_p \approx (0,65 \div 0,75)\tau$. При этих условиях в зазоре распределение поля приближается к синусоидальному и ЭДС становится близкой к синусоиде (см. рис. 4.16).

При наличии зубцов и пазов на статоре кривая индукции отклоняется от синусоиды. Однако в кривой ЭДС за счет

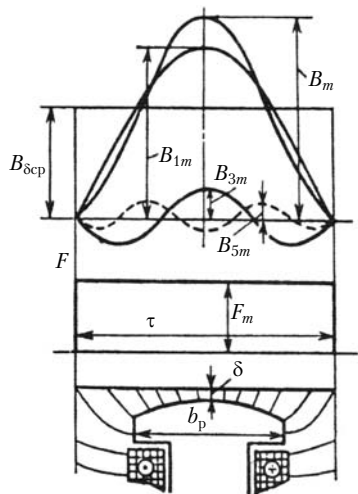


Рис. 4.16. Поле явнополюсной синхронной машины при холостом ходе

укорочения шага обмотки якоря, выбора определенного числа пазов на полюс и фазу q , соединением фаз обмотки в звезду или треугольник достигается уменьшение высших гармоник, и кривая ЭДС остается синусоидальной. Наличие высших гармоник в поле возбуждения вызывает добавочные магнитные потери.

Для характеристики поля при холостом ходе вводят коэффициент формы поля возбуждения k_f и коэффициент потока возбуждения k_Φ .

Коэффициент формы поля возбуждения

$$k_f = \frac{B_{\delta 1m}}{B_{\delta}}, \quad (4.12)$$

где $B_{\delta 1m}$ — амплитуда 1-й гармоники индукции в воздушном зазоре; B_{δ} — индукция в зазоре на оси полюса.

Если поле синусоидальное, $k_f = 1$. Обычно коэффициент формы поля равен 1,05–1,2.

Коэффициент потока возбуждения

$$k_{\Phi} = \frac{\Phi_{fm}}{\Phi_{f1m}}, \quad (4.13)$$

где Φ_{fm} — полный поток возбуждения; Φ_{f1m} — поток возбуждения, найденный по 1-й гармонике индукции:

$$\Phi_{f1m} = \tau l_{\delta} B_{\delta \text{ср}} = \alpha_{\delta} \tau l_{\delta} B_{\delta}, \quad (4.14)$$

где α_{δ} — расчетный коэффициент полюсного перекрытия:

$$\alpha_{\delta} = \frac{\Phi_{fm}}{\tau l_{\delta} B_{\delta}} = \frac{B_{\delta \text{ср}}}{B_{\delta}}, \quad (4.15)$$

здесь $B_{\delta \text{ср}}$ — средняя индукция в воздушном зазоре (см. рис. 4.16):

$$B_{\delta \text{ср}} = \frac{\Phi_{fm}}{\tau l_{\delta}}. \quad (4.16)$$

Коэффициент формы ЭДС может быть определен через отношение индукций

$$k_B = \frac{B_{\delta \text{д}1}}{B_{\delta \text{ср}}}, \quad (4.17)$$

где $B_{\delta \text{д}1}$ — действующее значение магнитной индукции 1-й гармоники:

$$B_{\delta \text{д}1} = \frac{B_{\delta 1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi \Phi_{fm}}{2\sqrt{2} k_{\Phi} \tau l_{\delta}}. \quad (4.18)$$

При синусоидальном поле коэффициент формы ЭДС k_B , в общем случае равный: $k = \frac{\pi}{2\sqrt{2} k_{\Phi}}$, будет $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$.

Классическая теория синхронных машин оперирует с 1-й гармоникой МДС якоря и обмотки возбуждения. Приведенные выше расчеты позволяют выделить 1-ю гармонику поля возбуждения в явнополюсных машинах и по ней провести анализ процессов электрохимического преобразования энергии.

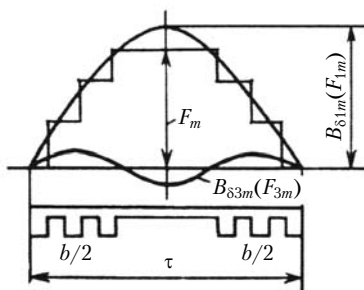


Рис. 4.17. Поле неявнополюсной синхронной машины при холостом ходе

В неявнополюсных синхронных машинах воздушный зазор равномерный, синусоидальное распределение поля обмотки возбуждения достигается за счет распределения МДС.

Обмотки возбуждения в турбогенераторах расположены в пазах, и распределение МДС за счет наличия большого зубца приближается к трапецеидальному (рис. 4.17). Ступенчатую кривую МДС можно разложить в гармонический ряд и определить значения 1-й, 3-й и других высших гармоник МДС F_{1m} .

Для амплитуды v -й гармоники:

$$F_v = \frac{2qk_{pv}}{\pi v} i \omega_k = \frac{4k_{pv}}{\pi v} i \omega, \quad (4.19)$$

где $\omega = \omega_k \frac{q}{2}$ — число витков обмотки возбуждения на полюс; k_{pv} — коэффициент распределения v -й гармоники; q — число катушек; ω_k — число витков в катушке.

При равномерном зазоре можно считать, что кривая индукции повторяет кривую МДС и

$$B_v = \mu_0 F_v \lambda_0; \quad (4.20)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{\delta}. \quad (4.21)$$

В неявнополюсной машине без учета насыщения коэффициенты k_Φ , k_f , k_B зависят от отношения длины части окружности ротора, занятой обмоткой, к полюсному делению τ :

$$k_f = \frac{B_{\delta 1m}}{B_\delta} = \frac{F_{f1m}}{F_{fm}} = \frac{4}{\pi} k_{pf}, \quad (4.22)$$

где k_{pf} — коэффициент распределения для 1-й гармоники МДС:

$$k_{pf} \approx \frac{\sin \frac{\rho\pi}{2}}{\frac{\rho\pi}{2}}, \quad (4.23)$$

где $\rho = \frac{b}{\tau}$ — относительная длина обмотанной части полюса (см. рис. 4.17).

Насыщение зубцовой зоны и наличие зубцов на статоре приводят к увеличению амплитуд высших гармоник поля в воздушном зазоре. Влияние насыщения и зубцов на поле машины, необходимое при проектировании, рассчитывается по поправочным коэффициентам, которые учитывают геометрию машины и степень насыщения [11].

По магнитному потоку Φ_{fm} в воздушном зазоре можно определить ЭДС обмотки статора:

$$E_0 = 4k_B \Phi_{fm} f_1 w_1 k_{o1}. \quad (4.24)$$

В этой формуле не учитываются высшие гармоники. Коэффициент k_B принимается с учетом насыщения и формы зазора.

При постоянной частоте вращения в функции тока возбуждения снимают характеристику холостого хода (рис. 4.18). При изменении тока возбуждения от нуля, ЭДС и поток сначала изменяются по линейному закону, а затем, при близких к номинальным значениям тока возбуждения и ЭДС, из-за насыщения магнитной цепи характеристика холостого хода отклоняется от линейного закона. При больших насыщениях характеристика холостого хода снова становится линейной (см. рис. 4.18).

По характеристике холостого хода можно определить коэффициент насыщения

$$k_H = \frac{ac}{ab}. \quad (4.25)$$

Отрезок bc определяет МДС, приходящуюся на «стальные» участки магнитной системы. Если машина ненасыщенная, то характеристика холостого хода линейная. Чтобы обеспечить лучшее использование материалов, при проектировании рабочая точка выбирается на колене XXX (точка c) на рис. 4.18.

Характеристики холостого хода стандартизированы. В табл. 4.1 даны стандартные характеристики холостого хода для turbo- и гидрогенера-

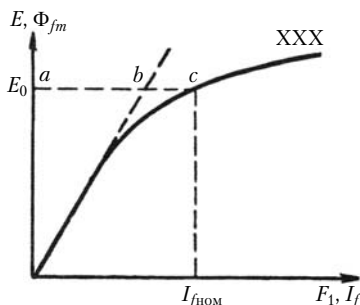


Рис. 4.18. Характеристика холостого хода

торов в относительных единицах. Стандартизация характеристики холостого хода необходима для обеспечения успешного включения генераторов на параллельную работу.

Таблица 4.1

I_f		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
E_f	Т	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
	Г	0,53	1	1,23	1,3	1,4	1,46	1,51

Примечание. Т — турбогенератор, Г — гидрогенератор.

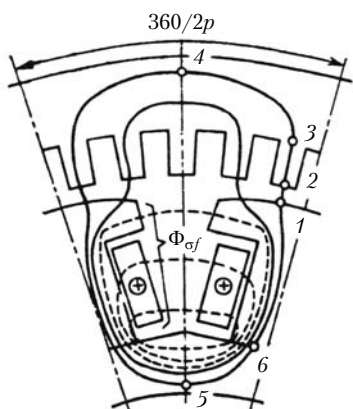


Рис. 4.19. К расчету магнитной цепи синхронной машины

сыщения и определяется коэффициентом рассеяния

При холостом ходе кроме потока в воздушном зазоре, который наводит ЭДС в обмотке якоря, в синхронной машине есть поток рассеяния обмотки возбуждения $\Phi_{\delta f}$, сцепленный только с обмоткой возбуждения (рис. 4.19). Поток рассеяния обмотки возбуждения замыкается вокруг обмотки возбуждения в межполюсном пространстве и по торцам полюсов и не наводит ЭДС в обмотке якоря. Поток рассеяния зависит от конструкции машины, на-

$$\sigma_f = \frac{\Phi_{fm} + \Phi_{\delta f}}{\Phi_{fm}}. \quad (4.26)$$

Поток рассеяния обмотки возбуждения различен для турбо- и гидрогенераторов. Для гидрогенераторов он больше и может достигать 30—40% рабочего потока. В турбогенераторах поток рассеяния существенно меньше и равен 4—8% рабочего потока.

4.5. Расчет магнитной цепи синхронных машин

Магнитную цепь машины рассчитывают при холостом ходе. При расчете определяют ток возбуждения I_f , МДС F_{fm} , которые создают в зазоре магнитный поток, необходимый

для создания ЭДС в обмотке статора E . Расчет магнитной цепи производят на основе закона полного тока для средней магнитной линии, состоящей для явно- и неявнополюсных машин из пяти участков (см. рис. 4.19):

$$\sum F = F_{\delta} + F_z + F_{a1} + F_{a2} + F_m, \quad (4.27)$$

где F_{δ} — магнитное напряжение воздушного зазора (участок 1–2); F_z — магнитное напряжение зубцов статора (участок 2–3); F_{a1} — магнитное напряжение ярма якоря (участок 3–4); F_{a2} — магнитное напряжение ярма ротора (участок 5–6); F_m — магнитное напряжение полюсов (участок 6–1).

Рассмотрим расчет магнитной цепи для явнополюсной машины.

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} k_{\delta} \delta, \quad (4.28)$$

где $B_{\delta} = \frac{\Phi_{f_m}}{a_{\delta} \tau l_{\delta}}$; $k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2}$ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий зубчатость статора и наличие пазов демпферной обмотки на роторе. При этом

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta}, \quad (4.29)$$

где t_{z1} — зубцовое деление якоря;

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{n1}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{n1}}{\delta}}, \quad (4.30)$$

здесь b_{n1} — ширина открытого паза якоря.

Коэффициент воздушного зазора

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \delta}, \quad (4.31)$$

$$\text{где } \gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{n2}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{n2}}{\delta}}.$$

Здесь t_{z2} — зубцовое деление демпферной обмотки; b_{n2} — раскрытие паза демпферной обмотки.

Индукцию в воздушном зазоре выбирают по таблицам [11]. Поток воздушного зазора в зубцовой зоне проходит в основном по зубцам, а сечение зубца составляет примерно половину зубцового деления. Поэтому B_δ в зависимости от мощности и числа полюсов выбирают в пределах $0,8 \div 1$ Тл.

Магнитное напряжение зубцов якоря рассчитывают так же, как и для асинхронных машин (см. параграф 1.8). Обычно в синхронных машинах паз имеет прямоугольное сечение, а зубец — форму трапеции, поэтому находят индукцию в трех сечениях зубца, рассчитывают три значения напряженности, затем определяют среднее значение напряженности H_{cpz} . Тогда

$$F_{z1} = H_{cpz} l_{z1}, \quad (4.32)$$

где l_{z1} — высота зубца.

Магнитное напряжение в спинке якоря рассчитывают по уравнению (1.39), так же как и в асинхронных машинах.

Зная коэффициент рассеяния обмотки возбуждения σ_f и поток в воздушном зазоре, определяют поток в ярме ротора. По сечению ярма ротора находят индукцию в ярме ротора и по таблице для данного сорта стали — напряженность H_{a2} , а затем МДС

$$F_{a2} = H_{a2} l_{a2}, \quad (4.33)$$

где l_{a2} — длина средней силовой линии (участок 5–6 на рис. 4.19).

При расчете магнитного напряжения полюса определяют индукцию в полюсе, а затем, так же как и для других участков, по таблицам находят напряженность и, умножая ее на длину средней силовой линии, определяют F_m .

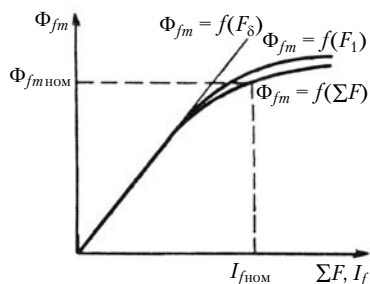


Рис. 4.20. Характеристика намагничивания и переходная характеристика

Просчитав магнитную цепь для нескольких значений B_δ , строят характеристику намагничивания $\Phi_{fm} = f(\Sigma F)$ (рис. 4.20).

Характеристика холостого хода повторяет характеристику намагничивания, так как ЭДС пропорциональна потоку.

В теории синхронных машин рассматривается также частичная или переходная харак-

теристика намагничивания $\Phi_{fm} = f(F_1)$, где $F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_{a1}$ — магнитное напряжение статора. Зависимость потока от F_δ $\Phi_{fm} = f(F_\delta)$ — линейная (см. рис. 4.20).

Расчет магнитной цепи неявнополюсной машины отличается от расчета явнополюсной машины лишь расчетом магнитного напряжения ротора. Расчет магнитного напряжения воздушного зазора F_δ , зубцов статора F_{z1} и ярма статора F_{a1} осуществляется так же, как для явнополюсной машины.

Магнитный поток в роторе неявнополюсной машины в основном проходит в области большого зубца. В области малых зубцов, где в пазах располагается обмотка возбуждения, насыщение меньше, так как по поперечной оси при холостом ходе поток возбуждения не проходит.

При расчете магнитного напряжения зубцов ротора F_{z2} берут среднее значение индукции в большом и малых зубцах. Найдя среднюю напряженность и умножив ее на высоту зубца, определяют магнитное напряжение F_{z2} .

В ярме ротора машины замыкаются рабочий поток и поток рассеяния. Сечения ярма определяются длиной ротора и расстоянием между дном пазов ротора и отверстием для вала. Магнитное напряжение ярма ротора (см. рис. 1.39):

$$F_{a2} = \xi H_{a2} l_{a2}, \quad (4.34)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий уменьшение длины средней силовой линии в ярме ротора, $\xi = 0,65 \div 0,85$ [11].

Определив ΣF для номинального значения E , найдем число витков и ток обмотки возбуждения:

$$\Sigma F = I_f w_f. \quad (4.35)$$

Расчет МДС проводят на полюс или на пару полюсов. Исходя из этого определяют и число витков обмотки возбуждения.

4.6. Магнитное поле синхронной машины при нагрузке. Реакция якоря

При нагрузке в обмотке якоря протекают симметричные токи, которые создают в воздушном зазоре вращающееся магнитное поле, неподвижное относительно поля обмотки возбуждения. Результирующее поле можно получить путем наложения поля якоря на поле возбуждения. Явления, связан-

ные с изменением поля при нагрузке и влияющие на характеристики машины, называют реакцией якоря. Реакция якоря в синхронной машине зависит от нагрузки и $\cos \varphi$ нагрузки.

Рассмотрим реакцию якоря в генераторном режиме при активной нагрузке. При холостом ходе максимум кривой ЭДС в отдельных проводниках обмотки статора совпадает с серединой полюса (рис. 4.21). Можно считать с достаточной точностью, что при нагрузке и напряжение будет иметь максимум под серединой полюса, так как $U \approx E$. При активной нагрузке $\cos \varphi = 1$ и максимум тока совпадает с максимумом напряжения. Поле реакции якоря замыкается по полюсным наконечникам и магнитопроводу статора так, как это показано на рис. 4.21, *а*.

Магнитодвижущая сила поля реакции якоря при активной нагрузке направлена перпендикулярно направлению МДС обмотки возбуждения, действующей по продольной оси машины. Поэтому реакцию якоря при активной нагрузке принято называть поперечной реакцией якоря.

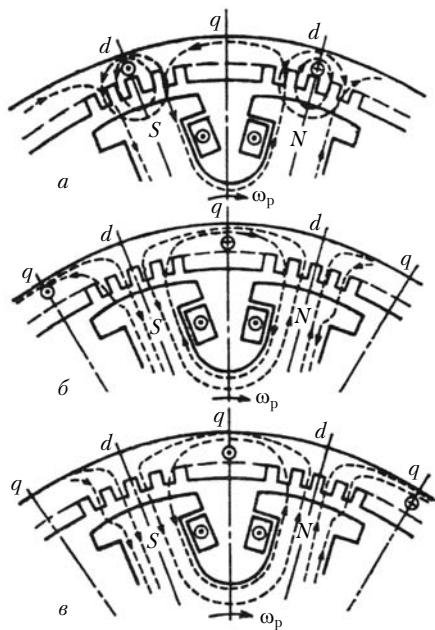


Рис. 4.21. Реакция якоря в синхронной машине:

а — поперечная реакция якоря при активной нагрузке; *б* — продольная размагничивающая реакция якоря при индуктивной нагрузке; *в* — продольная подмагничивающая реакция якоря при емкостной нагрузке

При активной нагрузке поле якоря, накладываясь на поле обмотки возбуждения, ослабляет поле на набегающей половине полюса и усиливает его на сбегающей половине полюса. При определении сбегающей и набегающей частей полюса считают ротор неподвижным, а статор — вращающимся (стрелкой показано направление вращения ротора) (см. рис. 4.21, *a — в*).

В ненасыщенной машине поле поперечной реакции якоря изменяет форму поля в воздушном зазоре, но не изменяет результирующий поток. В насыщенной машине увеличение поля под сбегающим краем полюса сказывается на результирующем потоке меньше, чем уменьшение поля под набегающей частью полюса. Поэтому в насыщенной машине поперечная реакция якоря не только искажает поле в воздушном зазоре, но и уменьшает результирующий поток (рис. 4.22, *a*).

При чисто индуктивной нагрузке синхронного генератора, когда ток отстает от напряжения на электрический угол 90° , реакция якоря размагничивающая (см. рис. 4.21, *б*). Магнитодвижущая сила реакции якоря при индуктивной нагрузке направлена навстречу МДС обмотки возбуждения. При работе синхронного генератора на индуктивную нагрузку поле в зазоре уменьшается.

При чисто индуктивной нагрузке реакция якоря продольная — поток реакции якоря замыкается по тем же путям, что и поток возбуждения. Размагничивающее действие реакции якоря в этом случае проявляется значительно сильнее, чем при поперечной реакции якоря (рис. 4.22, *б*).

При чисто емкостной нагрузке реакция подмагничивающая. Ток опережает напряжение на электрический угол 90° , и МДС реакции якоря и МДС обмотки возбуждения склады-

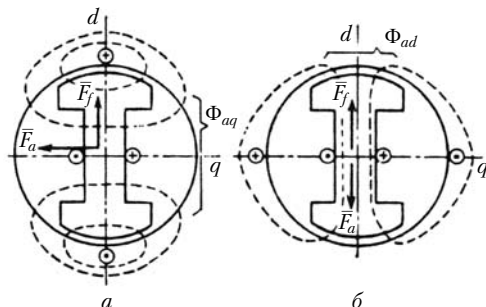


Рис. 4.22. Поле поперечной (*a*) и продольной (*б*) реакций якоря

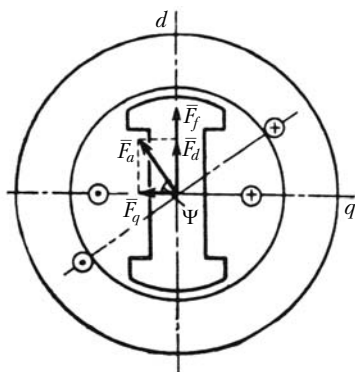


Рис. 4.23. Продольная и поперечная составляющие реакции якоря

обмотки возбуждения, а при активно-индуктивной нагрузке \vec{F}_d направлена навстречу \vec{F}_f (см. рис. 4.23).

В неявнополюсной машине при повороте вектора реакции якоря \vec{F}_a относительно осей машины продольная и поперечная составляющие не зависят от размеров воздушного зазора, так как зазоры по продольной и поперечной осям машины практически одинаковы.

В явнополюсной машине продольная и поперечная составляющие зависят не только от тока нагрузки, но и от положения вектора относительно осей машины, так как зазоры по продольной и поперечной осям различны.

Чтобы учесть влияние магнитного сопротивления воздушного зазора по продольной и поперечной осям машины, вводят коэффициенты реакции якоря по продольной k_{ad} и поперечной k_{aq} осям машины.

Коэффициенты k_{ad} и k_{aq} меньше единицы. При этом $k_{aq} < k_{ad}$ и коэффициент k_{aq} можно считать примерно равным 0,5, а $k_{ad} \approx 0,85 \div 0,95$. Значения k_{ad} и k_{aq} зависят от геометрии зубцовой зоны, числа пазов на полюс и фазу, полюсного деления и насыщения. С помощью k_{ad} и k_{aq} осуществляют так называемое приведение МДС якоря по продольной и поперечной осям машины. Приведенная продольная составляющая реакции якоря

$$F_{ad} = k_{ad} F_d. \quad (4.36)$$

Приведенная поперечная составляющая реакции якоря

$$F_{aq} = k_{aq} F_q. \quad (4.37)$$

ваются, образуя результирующее поле. В этом случае продольная реакция якоря — подмагничивающая (рис. 4.21, в).

В общем случае при смешанной нагрузке $z_n = R_n + jx_n$ реакция якоря \vec{F}_a имеет две составляющие: продольную \vec{F}_d и поперечную \vec{F}_q (рис. 4.23).

Продольная составляющая совпадает с продольной осью машины d , а поперечная — с поперечной осью q . При смешанной нагрузке — активно-емкостной продольная реакция якоря совпадает с МДС

Введя в исследование процессов преобразования энергии в синхронных машинах приведенные продольные и поперечные составляющие реакции якоря, можно представить, что и ток якоря I_a состоит из продольной I_d и поперечной I_q составляющих:

$$I_d = I_a \sin \Psi; \quad I_q = I_a \cos \Psi. \quad (4.38)$$

Току I_d соответствует $F_d = F_a \sin \Psi$, а току I_q соответствует $F_q = F_a \cos \Psi$.

Ток якоря в продольной оси создает продольную реакцию якоря, а ток якоря по поперечной оси создает поперечную реакцию якоря.

При активно-индуктивной нагрузке отстающий от напряжения реактивный ток создает размагничивающую реакцию якоря. При активно-емкостной нагрузке опережающий реактивный ток создает подмагничивающую реакцию якоря.

4.7. Параметры синхронных машин в установившемся режиме

Параметры синхронной машины — это коэффициенты перед переменными в уравнениях, описывающих процессы преобразования энергии в синхронных машинах (4.5). Параметрами установившегося режима при симметричной нагрузке являются активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора.

Активные сопротивления фазы обмотки якоря r_a , обмотки возбуждения r_f и демпферной обмотки r_d — сопротивления, которые определяются по электрическим потерям соответственно в обмотках якоря, возбуждения и демпферной обмотке. Например, зная электрические потери в обмотке якоря $P_\Sigma = m_1 r_a I_a^2$, можно определить r_a и т.д. Это сопротивление несколько больше сопротивления для постоянного тока из-за вытеснения тока. Увеличение сопротивления на переменном токе зависит от частоты тока и размеров элементарного провода. Чтобы уменьшить вытеснение тока, применяют транспозицию проводников и выбирают проводники меньшей высоты.

В явнополусных машинах различают активные сопротивления демпферной обмотки по продольной $r_{dл}$ и поперечной r_{dq} осям машины.

К индуктивным сопротивлениям синхронной машины в установившемся режиме относятся индуктивные сопро-

тивления по продольной x_d и поперечной x_q осям, а также индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря. Индуктивные сопротивления рассеяния демпферной обмотки и обмотки возбуждения учитываются в переходных режимах.

При определении индуктивных сопротивлений предполагается существование рабочего потока, сцепленного с обмоткой якоря и обмоткой возбуждения Φ_m , и потока рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, сцепленного только с обмоткой якоря.

В неявнополюсной машине главное индуктивное сопротивление якоря или сопротивление взаимной индукции якоря x_a определяется по формуле

$$x_a = 2\pi f L_1 = \frac{4\mu_0 m_1 f_1 (w_1 k_{o1})^2}{\pi p} \lambda_{\delta}, \quad (4.39)$$

где L_1 — индуктивность обмотки якоря; $\lambda_{\delta} = \frac{\tau \lambda_{\delta}}{k_{\delta} \delta}$ — коэффициент проводимости равномерного зазора на один полюс.

Электродвижущая сила обмотки якоря от поля взаимной индукции якоря

$$\dot{E}_a = -j x_a \dot{I}_a = -j \frac{\omega \dot{\Psi}_{am}}{\sqrt{2}}, \quad (4.40)$$

где $\Psi_{am} = L_{11} \sqrt{2} I_a$ — потокосцепление взаимной индукции фазы от тока в якоре I_a .

В неявнополюсных машинах сопротивления в продольной и поперечной осях одинаковы, поэтому $x_a = x_d = x_q$. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки якоря зависит от индуктивности рассеяния фазы якоря $L_{\sigma a}$:

$$x_{\sigma a} = 2\pi f L_{\sigma a} = 4\pi \mu_0 f w_1^2 \frac{L_{\sigma}}{p q_1} \lambda_{\sigma a}. \quad (4.41)$$

Магнитная проводимость рассеяния обмотки якоря $\lambda_{\sigma a} = \lambda_{\pi a} + \lambda_{\lambda a} + \lambda_{\lambda a}$, где $\lambda_{\pi a}$ — магнитная проводимость пазового рассеяния; $\lambda_{\lambda a}$ — рассеяния лобовых частей обмотки якоря; а $\lambda_{\lambda a}$ — магнитная проводимость дифференциального рассеяния. Составляющие магнитной проводимости рассеяния зависят от геометрии машины и насыщения. Подробный расчет магнитных проводимостей приводится в книгах по проектированию электрических машин [11].

Индуктивное сопротивление рассеяния определяется магнитными сопротивлениями полей рассеяния. Поток рассея-

ния замыкается в пазовой и лобовой частях обмотки. На поток рассеяния влияет и дифференциальное рассеяние, создаваемое высшими гармониками. Индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей почти не зависит от насыщения, а дифференциальное рассеяние зависит от насыщения.

Поток рассеяния связан с ЭДС рассеяния следующим соотношением:

$$\dot{E}_{\sigma a} = -jx_{\sigma a}\dot{I}_a = -j\frac{\omega\dot{\Psi}_{\sigma}}{\sqrt{2}}, \quad (4.42)$$

где $\Psi_{\sigma} = L_{\sigma a}(\sqrt{2}I_a)$ — потокосцепление рассеяния фазы якоря.

Полное индуктивное сопротивление неявнополюсной синхронной машины

$$x_c = x_{\sigma a} + x_a. \quad (4.43)$$

В явнополюсных машинах индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям машины отличаются друг от друга, так как магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям машины из-за различия зазоров различны (см. рис. 4.22).

Индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x_d = x_{\sigma a} + x_{ad}, \quad (4.44)$$

где x_{ad} — индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси машины.

Индуктивное сопротивление по поперечной оси

$$x_q = x_{\sigma a} + x_{aq}, \quad (4.45)$$

где x_{aq} — индуктивное сопротивление реакции якоря в поперечной оси машины.

Индуктивное сопротивление реакции якоря по продольной оси

$$x_{ad} = 2\pi f L_{ad} = 2\pi f \frac{\Psi_{ad}}{\sqrt{2}I_d} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f_1 (w_1 k_{o1})^2 \lambda_{ad}, \quad (4.46)$$

где $\lambda_{ad} = \frac{k_d \tau \lambda_{\delta}}{k_{\delta} \delta}$ — коэффициент проводимости зазора по продольной оси; k_d — коэффициент формы поля по продольной оси.

Индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси

$$x_{aq} = 2\pi f L_{aq} = 2\pi f \frac{\Psi_{aq}}{\sqrt{2}I_q} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f_1 (w_1 k_{o1})^2 \lambda_{aq}, \quad (4.47)$$

где $\lambda_{aq} = \frac{k_q \tau \lambda_\delta}{k_\delta \delta} = k_q \lambda_\delta$ — коэффициент проводимости зазора по поперечной оси; k_q — коэффициент формы поля по поперечной оси.

Коэффициенты формы поля по продольной k_d и поперечной k_q осям учитывают влияние явнополюсной конструкции ротора на основную гармонику индукции. Коэффициенты формы поля являются функциями относительных размеров полюсного наконечника ротора и конфигурации зазоров (числа пазов, раскрытия паза и воздушного зазора).

Коэффициент формы поля по продольной оси зависит от насыщения, а коэффициент формы поля по поперечной оси не зависит от насыщения, так как зазор по поперечной оси значительно больше, чем по продольной оси машины, поэтому $x_{ad} > x_{aq}$.

Зная x_{ad} , k_d и k_q , можно определить x_{aq} из следующего соотношения:

$$x_{aq} = x_{ad} \frac{k_q}{k_d}. \quad (4.48)$$

Электродвижущие силы, индуцируемые токами по продольной и поперечной осям, равны:

$$\dot{E}_{ad} = -j \frac{\omega \dot{\Psi}_{ad}}{\sqrt{2}} = -j x_{ad} \dot{I}_d; \quad (4.49)$$

$$\dot{E}_{aq} = -j \frac{\omega \dot{\Psi}_{aq}}{\sqrt{2}} = -j x_{aq} \dot{I}_q, \quad (4.50)$$

где $\Psi_{ad} = L_{ad}(\sqrt{2}I_d)$, $\Psi_{aq} = L_{aq}(\sqrt{2}I_q)$ — потокосцепления реакции якоря по продольной и поперечной осям.

При холостом ходе поток в воздушном зазоре Φ_{fm} создается обмоткой возбуждения. Индуктивность обмотки возбуждения

$$L_f = \frac{\Psi_\delta}{i_f} = \frac{\tau w_f \Phi_{fm}}{i_f}. \quad (4.51)$$

Кроме поля в воздушном зазоре, существует поток рассеяния обмотки возбуждения. Полная индуктивность обмотки возбуждения

$$L_f = L_{f\delta} + L_{\sigma f}, \quad (4.52)$$

где $L_{\sigma f}$ — индуктивность рассеяния обмотки возбуждения.

В переходных режимах

$$e_f = -L_f \frac{di_f}{dt} \quad (4.53)$$

и L_f определяет время затухания тока в обмотке возбуждения при разомкнутых других контурах машины.

Активное сопротивление обмотки возбуждения определяется и рассчитывается по методике, изложенной в параграфе 1.15.

Параметры синхронных машин имеют важное значение для определения эксплуатационных показателей машины. Целесообразно сравнивать машины между собой, если параметры выражены в относительных единицах:

$$r_{a*} = \frac{r_a I_{\phi, \text{ном}}}{U_{\phi, \text{ном}}}; \quad x_* = \frac{x I_{\phi, \text{ном}}}{U_{\phi, \text{ном}}}; \quad z_* = \frac{z I_{\phi, \text{ном}}}{U_{\phi, \text{ном}}}. \quad (4.54)$$

Далее в обозначении всех величин для упрощения записи индекс * опускается.

В табл. 4.2 приведены значения параметров турбо- и гидрогенераторов для установившегося режима при симметричной нагрузке.

Таблица 4.2

Наименование	r_a	x_d	x_q	x_{ad}	x_{aq}	x_{od}
Турбогенераторы	0,002—0,008	1,6—2,2	1,6—2,2	1,5—2,1	1,5—2,1	0,08—0,25
Гидрогенераторы	0,002—0,02	0,6—1,8	0,4—1,2	0,5—1,5	0,3—0,9	0,1—0,3

Чем меньше воздушный зазор, тем больше индуктивное сопротивление. Уменьшение зазора уменьшает перегрузочную способность машины, но такая машина требует меньшего вложения активных материалов. Влияние реакции якоря сказывается сильнее в машинах с большими значениями индуктивных сопротивлений.

Как и в других электрических машинах, концентрация энергии магнитного поля в синхронных машинах происходит в воздушном зазоре, поэтому размеры зазора определяют характеристики и массогабаритные показатели. В синхронных машинах воздушный зазор выбирается таким

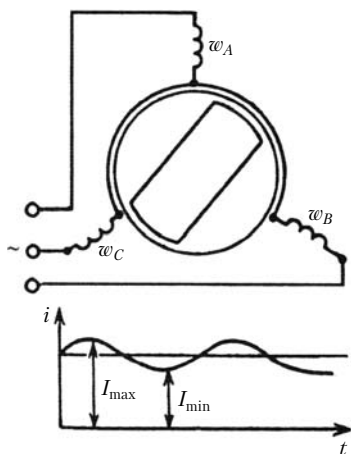


Рис. 4.24. Схема опыта скольжения (а), изменение тока якоря (б)

образом, чтобы x_{ad} и x_{aq} не превосходили определенных значений. Увеличение воздушного зазора приводит к увеличению объема обмотки возбуждения, увеличению габаритов и удорожанию машины. Заниженный зазор приводит к снижению устойчивости и значительному влиянию нагрузки на характеристики машины.

Увеличение мощности в тех же габаритах за счет внутреннего и водяного охлаждения привело в современных высокоиспользуемых машинах к увеличению линейной нагрузки. Чтобы снизить влияние реак-

ции якоря, в таких машинах приходится увеличивать воздушный зазор.

Параметры машины x_d и x_q могут быть определены опытным путем. Одним из способов, нашедших широкое применение при исследовании синхронных машин, является опыт скольжения.

При опыте скольжения ротор невозбужденной машины вращается приводным двигателем в сторону вращения поля с почти синхронной частотой вращения. При этом поле, создаваемое токами обмотки статора, попеременно совпадает с продольной или поперечной осями ротора (рис. 4.24). Это приводит к тому, что ток в обмотках статора изменяется с частотой, зависящей от разности $\omega_c - \omega_p$. По показаниям амперметра определяются токи, а по ним — сопротивления:

$$x_d = \frac{U}{\sqrt{3}I_{\min}}; \quad x_q = \frac{U}{\sqrt{3}I_{\max}}.$$

Здесь U — линейное напряжение; I_{\min} и I_{\max} — значения токов обмотки статора, полученные из опыта скольжения.

При испытаниях синхронных машин большой мощности проводить опыт скольжения трудно, так как надо иметь специальный приводной двигатель и обеспечивать питание машины соответствующими токами.

4.8. Характеристики синхронных генераторов

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются: характеристика холостого хода, внешняя, регулировочная и характеристика короткого замыкания.

Характеристика холостого хода XXX показана на рис. 4.25. Подробно она была рассмотрена в параграфе 4.4. Характеристика холостого хода имеет начальную прямолинейную часть OA, когда магнитная цепь не насыщена. Машина начинает насыщаться вблизи номинального значения ЭДС.

При глубоком насыщении XXX снова становится линейной. По XXX можно определить взаимную индуктивность между обмотками возбуждения и обмоткой якоря. Взаимная индуктивность имеет насыщенное и ненасыщенное значения и может быть определена как отношение ЭДС к току возбуждения.

Опытным путем характеристику холостого хода снимают при постоянной номинальной частоте вращения при изменении I_f и разомкнутой обмотке якоря ($I_a = 0$). При исследовании характеристики холостого хода сначала строят восходящую ветвь, а затем при уменьшении I_f — нисходящую. При расчетах используется средняя кривая. Гистерезис в синхронных машинах имеет место из-за того, что ротор не перемагничивается и по стали ротора замыкается постоянный поток возбуждения.

Внешними характеристиками синхронного генератора называются зависимости $U = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, снятые при неизменном токе возбуждения $I_f = \text{const}$.

На рис. 4.26 показаны внешние характеристики синхронного генератора в относительных единицах при чисто активной R , индуктивной L и емкостной C нагрузках. При актив-

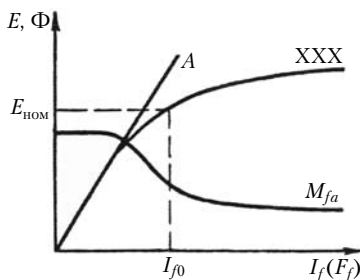


Рис. 4.25. Характеристика холостого хода синхронного генератора

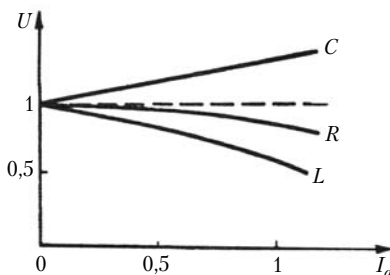


Рис. 4.26. Внешние характеристики синхронных генераторов

ной нагрузке при увеличении тока нагрузки I_a напряжение на выходе генератора уменьшается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины $z_a = r_a + jx_{\sigma a}$ и влияния поперечной реакции якоря. При индуктивной нагрузке за счет более сильного размагничивающего действия продольной реакции якоря внешняя характеристика при чисто индуктивной нагрузке идет ниже внешней характеристики при активной нагрузке. При емкостной нагрузке реакция якоря подмагничивающая, поэтому с ростом нагрузки растет напряжение на выводах генератора.

В процентном отношении внутреннее сопротивление машины по отношению к сопротивлению нагрузки обычно составляет небольшое значение, поэтому можно реакцию якоря при активной нагрузке считать без учета индуктивного сопротивления рассеяния обмотки якоря. В машинах небольшой мощности поперечная реакция якоря (чисто активный ток) будет при наличии в нагрузке небольшой емкости, компенсирующей индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря машины.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора $\Delta U_{\text{ном}}$ называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения (рис. 4.27)

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%. \quad (4.55)$$

Как правило, генераторы работают при отстающем токе с $\cos \varphi = 0,8$. ΔU обычно равно 20–30%, $\Delta U_{\text{ном}}$ тем больше, чем больше x_d . Значения $\Delta U_{\text{ном}}$ не лимитированы.

Регулировочная характеристика — это зависимость тока возбуждения от тока якоря $I_f = f(I_a)$ при постоянном напряжении, постоянной частоте вращения и неизменном $\cos \varphi$

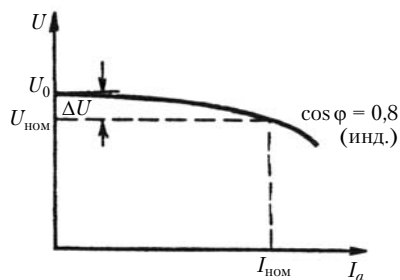


Рис. 4.27. К определению $\Delta U_{\text{ном}}$

нагрузки. Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным (рис. 4.28).

Регулировочные характеристики могут быть построены, если известны

внешние характеристики. При увеличении нагрузки при индуктивной нагрузке напряжение уменьшается (см. рис. 4.26). Чтобы напряжение оставалось неизменным, надо увеличивать ток возбуждения. При емкостной нагрузке при увеличении тока в якоре машины напряжение на выводах генератора растет (см. рис. 4.26). Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения (см. рис. 4.28).

Так же, как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны. При нагрузках, близких к номинальному значению, из-за насыщения регулировочные характеристики становятся нелинейными (см. рис. 4.28).

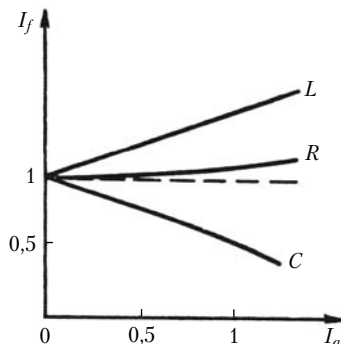


Рис. 4.28. Регулировочные характеристики синхронных генераторов

При работе синхронного генератора на емкостную нагрузку магнитное поле в машине создается током возбуждения и реактивными токами, протекающими в якоре. При небольших зазорах в синхронной машине, работающей на емкостную нагрузку, может наступить самовозбуждение, когда при отключенной обмотке возбуждения ($I_f = 0$) на выводах генератора появится напряжение. Это явление называется самовозбуждением синхронной машины. Более подробно явление самовозбуждения рассмотрено в параграфе 4.13.

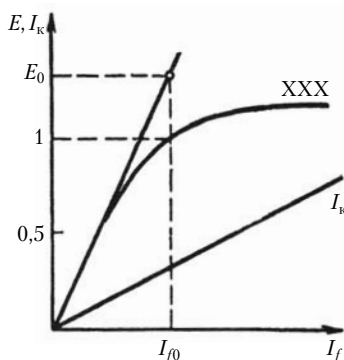


Рис. 4.29. Характеристика короткого замыкания

Одной из важных характеристик синхронной машины является характеристика короткого замыкания — зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_k = f(I_f)$ при симметричном коротком замыкании на выводах якоря при номинальной частоте вращения (рис. 4.29).

Зависимость тока короткого замыкания от тока возбуждения снимается при закороченной амперметрами обмотке якоря при постепенном повышении тока возбуждения от нуля до

значения I_k , примерно равного номинальному значению. Эта зависимость линейная, так как генератор не насыщен (работает при размагничивающей реакции якоря). Индуктивный характер тока при коротком замыкании определяется индуктивным сопротивлением обмотки якоря, которое значительно больше активного сопротивления обмотки (в относительных единицах $R = 0,01 \div 0,001$, а $x_d = 1,0 \div 2,5$).

Ток короткого замыкания может быть определен как

$$I_k = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + x_d^2}}, \quad (4.56)$$

где E_0 — ЭДС, соответствующая току возбуждения I_{f0} , которая определяется по спрямленной характеристике холостого хода.

Пренебрегая активным сопротивлением, ток короткого замыкания можно определить как

$$I_k = \frac{E_0}{x_d}. \quad (4.57)$$

В относительных единицах ток короткого замыкания обратно пропорционален x_d . Таким образом, можно по характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания определить опытным путем x_d .

Важное значение имеет кратность тока короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном номинальному (рис. 4.30),

$$f_{k0} = \frac{I_{k0}}{I_{ном}} \quad (4.58)$$

и при номинальном токе возбуждения, при котором ток короткого замыкания равен $I_{к. ном}$,

$$f_{к. ном} = \frac{I_{к. ном}}{I_{ном}}. \quad (4.59)$$

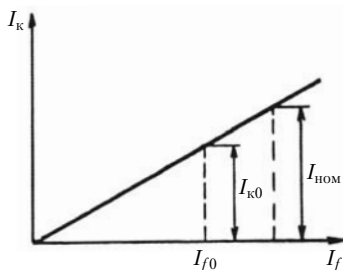


Рис. 4.30. К определению кратности тока короткого замыкания

Отношение тока короткого замыкания к номинальному току в относительных единицах при токе возбуждения I_{f0} , при котором $E_0 = U_{ном}$, называется *отношением короткого замыкания (ОКЗ)* и для ненасыщенной явнополюсной машины

$$\text{ОКЗ} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{x_d I_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{x_d}. \quad (4.60)$$

Если ОКЗ определяют по насыщенной характеристике холостого хода, то

$$\text{ОКЗ} = \frac{1,1 \div 1,2}{x_d}. \quad (4.60a)$$

Отношение короткого замыкания, так же как и x_d , определяет перегрузочную способность синхронной машины. Чем больше ОКЗ, тем больше предельная нагрузка; ОКЗ тем больше, чем больше воздушных зазор, т.е. при той же мощности меньше концентрация энергии магнитного поля. Такие машины требуют больших вложений материалов, что увеличивает их стоимость. У турбогенераторов $\text{ОКЗ} = 0,4 \div 1,0$, а гидрогенераторов $0,8 \div 1,8$.

Нагрузочная характеристика — это зависимость напряжения на генераторе от тока возбуждения $U = f(I_f)$ при постоянных токе якоря, $\cos \varphi$ нагрузки и частоте вращения (рис. 4.31). При изменении напряжения ток в якоре поддерживается неизменным путем регулирования сопротивления нагрузки. Нагрузочные характеристики снимают только при индуктивной нагрузке. Поэтому и называют зависимость $U = f(I_f)$ при $\cos \varphi = \text{const}$ индукционной нагрузочной характеристикой.

Индукционная нагрузочная характеристика является вспомогательной характеристикой и используется для определения индуктивного сопротивления рассеяния. Для этого необходимо иметь характеристику холостого хода XXX и индукционную нагрузочную характеристику, снятые опытным путем (рис. 4.32). Имея эти характеристики, мож-

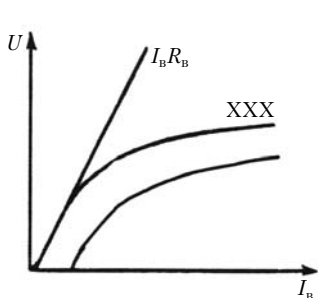


Рис. 4.31. Нагрузочная характеристика

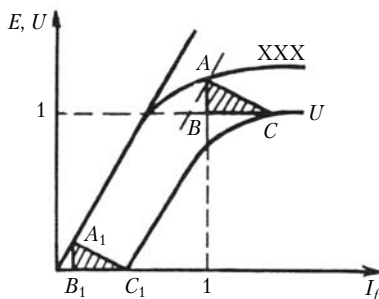


Рис. 4.32. К построению реактивного треугольника

но построить реактивный треугольник ABC . В треугольнике ABC катет AB равен падению напряжения в сопротивлении рассеяния якоря $I_a x_{\sigma a}$, а горизонтальный катет BC равен МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения, в котором построены характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика (см. рис. 4.32).

Реактивный треугольник показывает, что уменьшение напряжения при снятии нагрузочной характеристики происходит вследствие падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $x_{\sigma a}$ (катет AB) и размагничивающего действия реакции якоря (катет BC).

Если известны катеты реактивного треугольника, то по характеристике холостого хода XXX можно построить нагрузочную характеристику, передвигая реактивный треугольник параллельно самому себе (треугольник $A_1 B_1 C_1$). Если имеются снятые опытным путем XXX и нагрузочная характеристика, можно определить $x_{\sigma a}$, зная продольную реакцию якоря (катет BC в масштабе тока возбуждения). Приблизительно катеты реактивного треугольника определяются по спрямленной XXX так, как это показано на рис. 4.32.

Рассмотренные характеристики дают возможность судить об основных электромагнитных показателях машины. Однако о КПД и распределении тепловых полей по ним судить нельзя.

Определение потерь в синхронных машинах осуществляется так же, как и в асинхронных машинах, с учетом того, что в обмотке ротора синхронной машины протекает постоянный ток. К добавочным потерям относят поверхностные потери в роторе. Основные потери в меди включают потери в обмотке якоря и обмотке возбуждения. Потери в обмотке возбуждения считают с учетом потерь в возбудителе:

$$P_f = \frac{I_{f\text{ном}}^2 R_f + 2\Delta U_{\text{щ}} I_{f\text{ном}}}{\eta_f}, \quad (4.61)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения в щеточном контакте ($\Delta U_{\text{щ}} \approx 1$ В). Если возбуждение бесконтактное, эта составляющая потеря отсутствует; η_f — КПД возбудителя ($\eta_f = 0,8 \div 0,85$).

Сопротивление обмотки возбуждения определяют без учета вытеснения тока по формуле (1.115) и приводят к расчетной температуре 75°C .

Особенности расчета механических и добавочных потерь для различных типов синхронных машин рассматриваются в курсах проектирования синхронных машин [11].

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{\text{ном}} + \sum P}, \quad (4.62)$$

где $\sum P$ — сумма потерь:

$$\sum P = P_{\text{эл}} + P_f + P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{доб}}, \quad (4.63)$$

здесь $P_{\text{эл}}$ — электрические потери в обмотке якоря; P_f — электрические потери в обмотке возбуждения; $P_{\text{ст}}$ — потери в стали; $P_{\text{мех}}$ — механические потери; $P_{\text{пов}}$ — поверхностные потери; $P_{\text{доб}}$ — добавочные потери.

Характеристика $\eta = f(P_{\text{ном}})$ аналогична показанной на рис. 1.87. Для крупных синхронных машин КПД достигает 98–99%.

4.9. Векторные диаграммы неявнополюсных синхронных генераторов

Процессы электромеханического преобразования энергии в синхронной неявнополюсной машине описываются в установившемся режиме уравнениями (4.9), (4.10) или более простыми уравнениями, полученными из представления машины в виде четырехполюсника (см. рис. 4.4).

В неявнополюсной синхронной машине зазор по продольной и поперечной осям машины одинаковый и поэтому $x_d = x_q = x_c$. Для ненасыщенной неявнополюсной синхронной машины уравнения (4.9) могут быть записаны в следующем виде:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_0 - jx_c \dot{I}_a - r_a \dot{I}_a, \quad (4.64)$$

где \dot{E}_0 — ЭДС при холостом ходе.

Уравнения неявнополюсной синхронной машины (4.64) можно представить следующим образом:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_0 - jx_{ad} \dot{I}_a - jx_{\sigma a} \dot{I}_a - r_a \dot{I}_a, \quad (4.65)$$

здесь x_{ad} — индуктивное сопротивление реакции якоря ($x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}$); $\dot{E}_0 - jx_{ad} \dot{I}_a = \dot{E}_\delta$ — ЭДС воздушного зазора, которая также равна $\dot{U}_a + jx_{\sigma a} \dot{I}_a + r_a \dot{I}_a$.

\dot{E}_δ измерить нельзя, но ее нетрудно представить как напряжение на выходе машины плюс падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины $z_a = r_a + jx_{\sigma a}$, состоящем из активного r_a и индуктивного сопротивления рассеяния $x_{\sigma a}$ обмотки якоря. С учетом сказанного из выражения (4.65)

$$\dot{U}_a = \dot{E}_\delta - jx_{\sigma a}\dot{I}_a - r_a\dot{I}_a. \quad (4.65a)$$

Для уравнений (4.64) и (4.65) может быть построена векторная диаграмма, показанная на рис. 4.33.

При холостом ходе на выводах генератора имеет место напряжение \dot{E}_0 . При нагрузке напряжение изменяется из-за реакции якоря, что характеризуется вектором $j\dot{I}_ax_a$. Напряжение на выводах генератора \dot{U}_a получается, если учесть падение напряжения на сопротивлении обмотки якоря z_a . Падение напряжения на обмотке якоря состоит из падения напряжения на активном сопротивлении \dot{I}_ar_a и индуктивном сопротивлении рассеяния ($j\dot{I}_ax_{\sigma a}$).

Падение напряжения на выводах машины в большой степени зависит от характера нагрузки. Векторная диаграмма рис. 4.33 построена для смешанной индуктивно-активной нагрузки. Со стороны нагрузки $\dot{U}_a = \dot{I}_az_n$. Характер нагрузки определяется углом φ между напряжением \dot{U}_a и током \dot{I}_a . При работе генератора на емкостную нагрузку реакция якоря — подмагничивающая, на векторной диаграмме вектор \dot{I}_ax_{ad} будет направлен в сторону, противоположную вектору \dot{U}_a , и \dot{U}_a будет больше \dot{E}_0 .

Векторная диаграмма неявнополюсной машины построена без учета насыщения и соответствует выражению (4.65). Диаграмму МДС можно построить, если известна МДС яко-

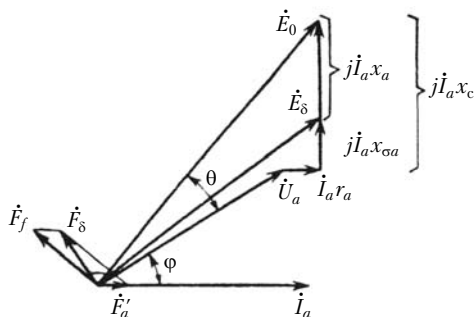


Рис. 4.33. Векторная диаграмма неявнополюсного генератора без учета насыщения

ря \dot{F}'_a , которая совпадает с током \dot{I}_a . Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения перпендикулярна \dot{E}_0 , а результирующая МДС \dot{F}'_8 равна геометрической сумме \dot{F}'_f и \dot{F}_j .

Магнитодвижущая сила якоря по 1-й гармонике (см. параграф 1.12):

$$F_a = 0,45 m_1 I_a \frac{w_a k_{o1}}{p}, \quad (4.66)$$

где w_a — число витков фазы обмотки якоря; k_{o1} — обмоточный коэффициент по 1-й гармонике.

Различный характер распределения МДС обмотки в воздушном зазоре якоря и обмотки возбуждения вдоль поверхности статора не позволяет геометрически складывать МДС этих обмоток; МДС \dot{F}'_a и \dot{F}_f можно сложить только после приведения их к единой базе — одинаковому виду распределения. В качестве базовой можно взять любую обмотку — якоря или возбуждения. В теории электрических машин равноправно используются оба подхода. При одном подходе выполняется приведение МДС обмотки якоря к МДС обмотки возбуждения. Для явнополюсной конструкции ротора коэффициенты приведения k_{ad} и k_{aq} (см. выражения (4.36) и (4.37)) по осям d и q будут различными. В неявнополюсной машине приведение МДС обмотки якоря к МДС обмотки ротора проводится в соответствии с выражением (4.22)

с помощью коэффициента реакции якоря $k_a = \frac{1}{k_f}$, обратного по отношению к коэффициенту формы поля возбуждения:

$$F'_{fm} = F_{f1m} \frac{1}{k_f} = F_{f1m} k_a$$

(приведенное значение МДС может быть обозначено штрихом).

При другом подходе осуществляют обратное приведение — МДС обмотки ротора к обмотке якоря, имея в виду ее основную гармонику. В этом случае из кривой МДС обмотки ротора выделяют ее основную гармонику. Так, при трапецеидальной форме МДС обмотки ротора (рис. 4.34) амплитудное значение основной гармоники в пренебрежении ступенчатостью кривой будет

$$F_{f1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sin \frac{\rho\pi}{2}}{\rho\pi/2} I_f w_f = \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \frac{\rho\pi}{2}}{\rho} I_f w_f, \quad (4.67)$$

где w_f — число витков обмотки возбуждения на один полюс.

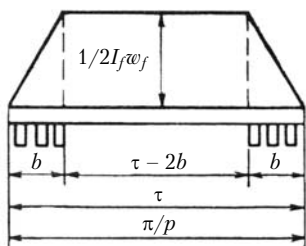


Рис. 4.34. К определению F_f неявнополусной синхронной машины

Коэффициент реакции якоря

$$k_a = \frac{\pi^2 \rho}{8 \sin \frac{\rho \pi}{2}},$$

где $\rho = b/\tau$.

Ввиду того что целью построения векторной диаграммы оказывается определение тока возбуждения I_f при заданных U , I и $\cos \varphi$, целесообразно рассмотреть построение векторной диаграммы с приведением МДС обмотки якоря к обмотке возбуждения.

Векторную диаграмму синхронной неявнополусной машины с учетом насыщения — диаграмму Потье (рис. 4.35) строят следующим образом.

Зная напряжение, ток и $\cos \varphi$, для которых должна быть построена векторная диаграмма, определяют ЭДС воздушного зазора \dot{E}_δ . Для этого необходимо знать активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки якоря. Определив из векторной диаграммы \dot{E}_δ , по характеристике холостого хода находят \dot{F}_a — результирующую МДС воздушного зазора. Далее, зная МДС реакции якоря \dot{F}_a' , коэффициент реакции якоря k_a , модуль и направление \dot{F}_δ (вектор \dot{F}_δ на векторной диаграмме перпендикулярен \dot{E}_δ), определяют МДС обмотки возбуждения при нагрузке:

$$\dot{F}_B = \dot{F}_\delta - k_a \dot{F}_a = \dot{F}_\delta - \dot{F}_a'$$

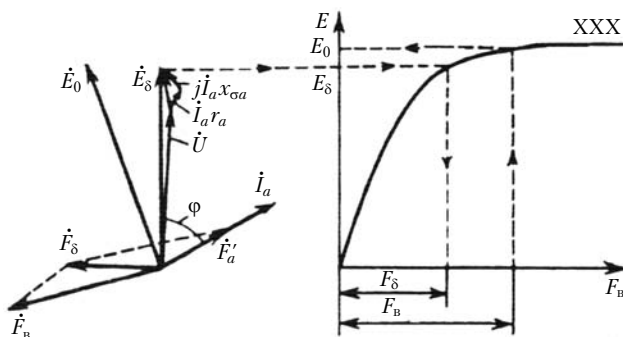


Рис. 4.35. Векторная диаграмма синхронного генератора с учетом насыщения

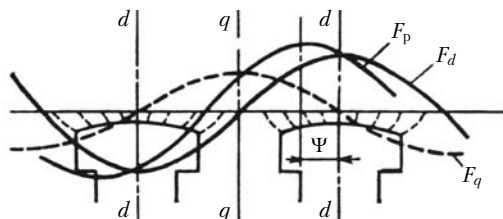


Рис. 4.37. Разложение результирующей МДС F_p на продольную F_d и поперечную F_q составляющие

дольную и поперечную, действующие соответственно по продольной и поперечной осям машины (рис. 4.37). Синусоидальное результирующее поле в воздушном зазоре F_p машины можно создать, если изменить амплитуды продольного F_d и поперечного F_q полей. При $F_q = 0$ F_p совпадает с продольной осью машины, а при $F_d = 0$ — с поперечной.

Чтобы найти сосредоточенные МДС реакции якоря, действующие по продольной и поперечной осям машины, разложим ток, протекающий в якоре машины, на две составляющие: продольную и поперечную (рис. 4.38). Соответственно найдем продольную и поперечную составляющие реакции якоря \dot{F}_d и \dot{F}_q . Чтобы определить приведенные продольные и поперечные составляющие реакции якоря, надо F_d и F_q умножить на коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям машины:

$$\begin{cases} F_{ad} = F_d k_{ad} = F_a \sin \psi k_{ad}, \\ F_{aq} = F_q k_{aq} = F_a \cos \psi k_{aq}, \end{cases} \quad (4.68)$$

где F_d и F_q — МДС по продольной и поперечной осям машины с равномерным воздушным зазором.

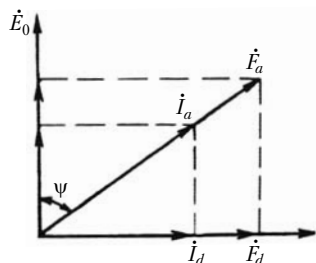


Рис. 4.38. К определению МДС и токов по продольной и поперечной осям машины

Коэффициенты приведения по продольной k_{ad} и поперечной k_{aq} осям машины учитывают неравномерность воздушного зазора и геометрию зубцовой зоны. По существу, вся сложность преобразования энергии в синхронной машине, обусловленная наличием спектра гармоник поля, несимметрией машины по продольной и поперечной осям, скрыта в коэффициентах приведения k_{ad} и k_{aq} . В книгах по про-

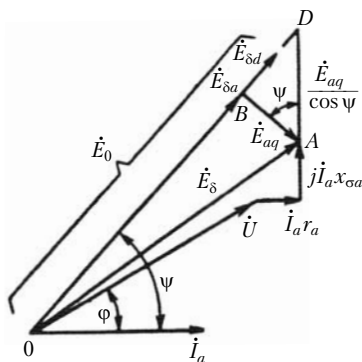


Рис. 4.39. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора

При известных значениях \dot{U} , \dot{I}_a и $\cos \varphi$ откладываем $\dot{I}_a r_a$ (рис. 4.39). На продолжении отрезка $j\dot{I}_a x_{\sigma a}$ откладываем отрезок AD , равный

$$AD = \frac{E_{aq}}{\cos \psi} = \frac{I_a x_{aq}}{\cos \psi} = I_a x_{aq}.$$

Значение AD можно найти из характеристики холостого хода (рис. 4.40)

$$F_a k_{aq} = \frac{F_{aq}}{\cos \psi}.$$

Магнитодвижущей силе $F_a k_{aq}$ соответствует ЭДС $\frac{E_{aq}}{\cos \psi}$ (см. рис. 4.39).

После того как найдена точка D , ее соединяют с началом диаграммы. На линии OD лежат векторы ЭДС $\dot{E}_{\delta d}$, \dot{E}_0 и \dot{E}_{ad} . Чтобы найти модули этих векторов, из точки A на линию OD опускают перпендикуляр AB . Из треугольника OAB следует, что отрезок AB представляет собой ЭДС \dot{E}_{ad} .

ектированию синхронных машин приводятся их значения в зависимости от отношения длины полюсного наконечника b_p к длине полюсного деления τ , числа полюсов p , формы полюсов [11]. Иногда учитывают влияние насыщения на коэффициенты k_d и k_q .

Коэффициенты k_{ad} и k_{aq} определяют как расчетным, так и опытным путем.

Векторная диаграмма явнополюсной машины может быть построена по уравнениям (4.64)–(4.68).

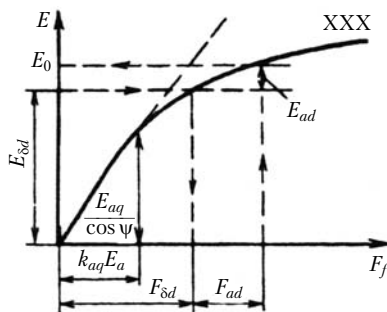


Рис. 4.40. К определению E_{ad} , F_{ad} , $F_{\delta d}$ и ЭДС холостого хода E_0

Зная $E_{\delta d}$, по характеристике холостого хода определяют $F_{\delta d}$. Затем находят $E_{ad} = k_{ad} F_a \sin \psi$. После этого по характеристике XXX, зная $F_{\delta d}$ и F_{ad} , определяют $\dot{E}_{\delta d}$, \dot{E}_0 и \dot{E}_{ad} (рис. 4.40) и достраивают векторную диаграмму (см. рис. 4.39).

Векторная диаграмма явнополюсной машины построена с учетом насыщения. Из нее можно определить $F_f = F_{\delta d} + F_{ad}$, необходимую для того, чтобы при нагрузке в обмотке якоря протекал ток нагрузки I_a при напряжении U и заданном $\cos \varphi$. В явнополюсной синхронной машине имеют место падения напряжения за счет продольной \dot{E}_{ad} и поперечной \dot{E}_{aq} реакций якоря и на сопротивлениях обмотки якоря r_a и $x_{\sigma a}$. В соответствии с методом двух реакций ЭДС обмотки якоря на векторной диаграмме представлена ЭДС по продольной и поперечной осям \dot{E}_{ad} и \dot{E}_{aq} .

Диаграмма на рис. 4.39 построена для индуктивно-активной нагрузки. Аналогично можно построить диаграммы и для активной и активно-емкостной нагрузок.

Без учета насыщения, если известны сопротивления x_d и x_q , векторная диаграмма синхронной явнополюсной машины может быть построена так, как это показано на рис. 4.41. Эта упрощенная векторная диаграмма дает достаточно хорошие результаты при построении характеристик крупных синхронных явнополюсных машин.

Приведенные диаграммы не исчерпывают встречающихся в литературе вариантов построения векторных диаграмм синхронных машин. Однако все уточнения векторных диаграмм справедливы, если при этом изменяются уравнения,

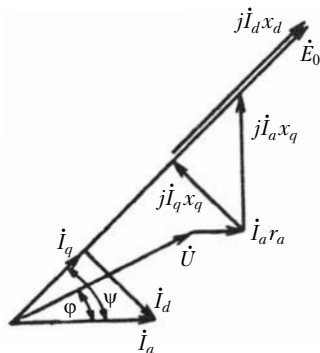


Рис. 4.41. Векторная диаграмма синхронной машины без учета насыщения

описывающие процессы преобразования энергии. Недостатком всех векторных диаграмм является то, что их строят для синусоидальных токов и напряжений без строгого учета высших гармоник в воздушном зазоре машины и наличия нескольких контуров на статоре и роторе по продольной и поперечной осям.

Векторные диаграммы при коротком замыкании являются частным случаем рассмотренных диаграмм, когда $U = 0$ (рис. 4.42).

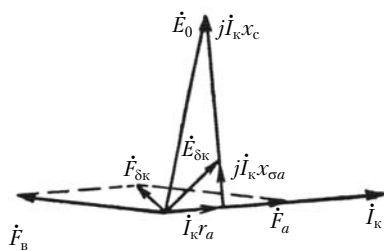


Рис. 4.42. Векторная диаграмма при коротком замыкании

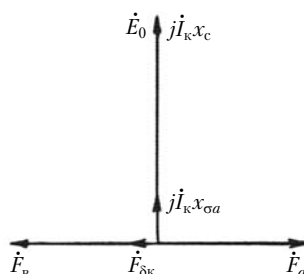


Рис. 4.43. Векторная диаграмма при коротком замыкании без учета активного сопротивления обмотки якоря r_a

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки якоря, векторную диаграмму можно еще более упростить (рис. 4.43). При этом $\dot{E}_0 = j\dot{I}_K x_c$, где x_c — индуктивное синхронное сопротивление, равное x_d в явнополюсной машине.

При коротком замыкании реакция якоря — размагничивающая и, пренебрегая $\dot{F}_{\delta K}$, можно считать, что $\dot{F}_f \approx \dot{F}_a$, поле в воздушном зазоре стремится к нулю, машина не насыщена (см. параграф 4.8).

В последние годы благодаря применению ЭВМ решаются все более сложные системы уравнений, описывающие процессы преобразования энергии в синхронных машинах, с учетом нелинейностей параметров, нескольких контуров на статоре и роторе и высших гармоник в воздушном зазоре [7].

4.11. Параллельная работа синхронных машин

Синхронные машины, как правило, работают совместно с другими синхронными машинами. Электрические станции объединяются в единую энергетическую систему, и все синхронные генераторы в такой системе подключены через трансформаторы к общим шинам, к которым также через трансформаторы подключены синхронные и асинхронные двигатели. Общими шинами являются высоковольтные линии электропередачи.

Энергетическая система России объединяет большинство электрических станций. Мощность генераторов ОЭС России около 200 ГВт. Она протянулась от северных до южных границ нашей страны и на восемь часовых поясов с востока на запад. В первом приближении ее можно предста-

вить в виде эквивалентного синхронного генератора, а нагрузку — в виде эквивалентного сопротивления и эквивалентных асинхронных и синхронных двигателей.

Объединенная энергетическая система позволяет рационально использовать энергетические ресурсы целых районов, обеспечивает экономичную и надежную работу электрических станций. При объединении электрических станций в единую систему обеспечивается экономичное покрытие суточных максимумов нагрузки, а также резервирование и маневрирование агрегатов электростанций. Все электростанции системы управляются с центрального диспетчерского пункта управления.

При исследовании процессов преобразования энергии в синхронных машинах, работающих параллельно с сетью, считается, что сеть имеет бесконечно большую мощность, т.е. ее сопротивление равно нулю и напряжение на выводах генератора остается неизменным при любых режимах работы. Работа отдельной синхронной машины практически не влияет на сеть.

Синхронная машина после подключения к сети работает синхронно с другими машинами. При этом частота вращения синхронных машин определяется числом полюсов. Двухполюсные турбогенераторы имеют частоту вращения $n = 3000$ об/мин, а частота вращения многополюсных ма-

шин $n = \frac{60f}{p}$ об/мин.

Рассмотрим синхронную машину, работающую вхолостую. При синхронном по отношению к частоте сети вращении ротора \dot{U}_c уравнивается \dot{E}_0 (рис. 4.44, а) и в обмотке якоря машины ток \dot{I}_0 равен нулю.

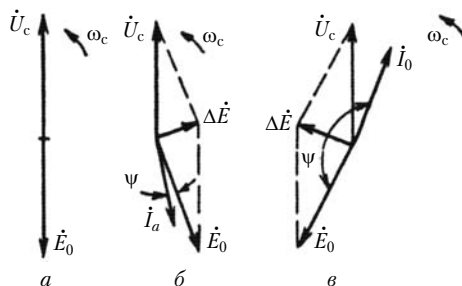


Рис. 4.44. Упрощенные векторные диаграммы синхронной машины, работающей параллельно с сетью бесконечной мощности:

а — холостой ход; б — режим генератора; в — режим двигателя

Если ротор машины начнет ускоряться, появится $\Delta \dot{E}$, которая в контуре сеть — машина создает уравнивающий ток, и ротор снова займет прежнее положение (рис. 4.44, б). Если ротор замедляется, $\Delta \dot{E}$ изменяет направление и уравнивающий ток создает момент, ускоряющий ротор, который возвратит машину в исходное положение (рис. 4.44, в).

Результирующая ЭДС $\Delta \dot{E}$ создает ток

$$\dot{I}_a = -j \frac{\Delta \dot{E}}{x_c}, \quad (4.69)$$

где x_c — синхронное сопротивление машины.

Ток определяется сопротивлением машины, так как сеть бесконечной мощности имеет сопротивление, равное нулю. При этом учитывается только индуктивное сопротивление синхронной машины, поскольку активным сопротивлением можно пренебречь.

В рассмотренном примере момент сопротивления на валу машины M_c был равен нулю. В зависимости от момента на валу при параллельной работе синхронная машина работает в генераторном, двигательном режимах, а при $M_c = 0$ — в режиме синхронного компенсатора.

В генераторном режиме механическая мощность преобразуется в электрическую. К валу машины приложен момент, который пытается увеличить частоту вращения ротора. Однако, если машина работает в генераторном или двигательном режиме, при параллельной работе возникает противодействующий синхронизирующий момент, удерживающий машину в синхронизме. Поле в воздушном зазоре деформируется (рис. 4.45). Нагрузку машины можно характеризовать электрическим углом θ между осью поля и осью полюсов. Этот угол принято называть углом нагрузки.

Если пренебречь потерями в машине, можно считать, что отдаваемая в сеть мощность равна мощности, сосредоточенной в воздушном зазоре. Эта мощность называется электромагнитной мощностью $P_{эм}$. Она может быть определена из векторной диаграммы (рис. 4.44, б) как

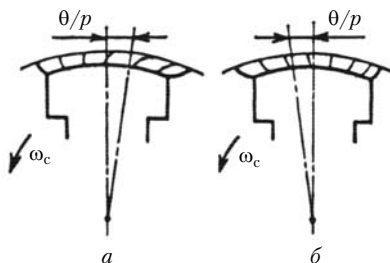


Рис. 4.45. Параллельная работа синхронной машины с сетью:

а — генераторный; б — двигательный режимы

$$P_{\text{эм}} = mE_0I_a \cos \psi. \quad (4.70)$$

Далее мощность $P_{\text{эм}}$ будет определена так же, как функция угла θ .

В двигательном режиме к валу синхронной машины приложен момент сопротивления, и электрическая энергия, забираемая из сети, преобразуется в механическую энергию. При этом

$$P_{\text{эм}} = mE_0I_a \cos \psi < 0. \quad (4.71)$$

Ось ротора отстает от оси поля (рис. 4.45, б), а угол θ изменяет знак. Можно считать, что в режиме двигателя направление мощности изменяет знак по сравнению с генераторным режимом. На векторных диаграммах рис. 4.44 это характеризуется изменением угла сдвига тока по отношению к напряжению сети \dot{U}_c .

При параллельной работе активная электрическая мощность уравнивается механической мощностью на валу машины, а момент на валу машины уравнивается электромагнитным моментом. Максимальный момент, развиваемый двигателями, подключенными к сети, определяется током возбуждения и параметрами двигателя.

В режиме синхронного компенсатора $M_c = 0$ и синхронная машина работает как генератор реактивной мощности, отдавая или потребляя из сети реактивную мощность.

Основным достоинством синхронных машин перед асинхронными машинами является то, что в зависимости от тока возбуждения синхронная машина отдает в сеть или потребляет из сети реактивную мощность. При перевозбуждении синхронная машина является по отношению к сети емкостью, а при недовозбуждении — индуктивностью. Подробно распределение активных и реактивных мощностей в синхронной машине, работающей параллельно с сетью бесконечной мощности, рассмотрено в следующем параграфе.

Для анализа сложных электромеханических процессов во множестве электрических машин, работающих параллельно, энергетическую систему представляют эквивалентным синхронным генератором, эквивалентный ротор которого вращается с частотой сети, а нагрузку — эквивалентным асинхронным двигателем и активным сопротивлением. В энергосистеме в установившемся режиме вырабатываемая мощность расходуется в нагрузке и запасается во вращающихся роторах и в виде кинетической энергии и в магнитных по-

лях, причем соблюдается баланс между потребляемой и вырабатываемой мощностями.

При переходных процессах в энергосистеме изменение нагрузки покрывается изменением электрической энергии, вырабатываемой на электростанциях.

В переходных процессах в энергосистеме важное значение имеет запасенная кинетическая энергия синхронно вращающихся масс роторов электрических машин. Стабилизация частоты системы осуществляется путем изменения запасенной энергии. Однако для стабилизации частоты может быть израсходована лишь часть запасенной в энергосистеме энергии.

Потеря 1 млн кВт мощности в энергосистеме через 3—4 с приводит к снижению частоты в энергосистеме примерно на 0,2%. Таким образом, при постоянном напряжении в энергосистеме отклонение частоты от номинального значения свидетельствует о недостатке или превышении генерирующей мощности в системе.

Радикальным средством, повышающим устойчивость энергосистемы, является запас установленной мощности на электростанциях и наличие разветвленных электрических сетей с большой пропускной способностью, а также надежная работа электрических машин и трансформаторов.

4.12. Включение на параллельную работу синхронных генераторов

Нагрузка в энергосистеме изменяется в течение суток, недели и года. Поэтому есть блоки, покрывающие постоянную нагрузку, а другие включаются для покрытия пиков нагрузки. Постоянную нагрузку несут атомные станции, а турбогенераторы тепловых электростанций и гидрогенераторы на гидроэлектростанциях в течение года могут подключаться и отключаться от сети десятки и сотни раз в год.

Процесс разгона синхронной машины большой мощности и ее синхронизация оказывают значительное влияние на срок службы машины. При трогании гидрогенераторов должно быть обеспечено образование масляной пленки, разделяющей вращающуюся и неподвижную части подпятника. Система контроля температуры масла обеспечивает надежную работу машины в процессе подхода ротора к синхронной частоте вращения. Процесс пуска крупных турбо- и гидрогенераторов длится несколько десятков минут. Процессы

пуска и синхронизации, хотя и занимают по времени небольшую часть по сравнению с длительной работой параллельно с сетью, которая может продолжаться без отключения в течение нескольких месяцев, снижают надежность работы синхронных машин больше, чем длительная работа.

Процесс включения генератора на параллельную работу с сетью — синхронизация машины — может быть точной и грубой.

При точной синхронизации необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) частота сети и частота генератора должны быть одинаковыми;
- 2) напряжения сети и генератора совпадают по фазе и имеют одинаковые амплитуды;
- 3) порядки следования фаз сети и генератора должны совпадать.

При соблюдении этих условий генератор включается в сеть практически без бросков токов.

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения синхронного генератора, а равенство частот — путем регулирования частоты вращения ротора генератора. На станции частота вращения изменяется за счет изменения частоты вращения паровой или гидравлической турбин или за счет изменения частоты вращения приводного двигателя.

При этих условиях в контуре сеть — машина сумма ЭДС равна нулю (рис. 4.46). Говорят, что при синхронизации ЭДС находятся в противофазе, имея в виду, что они уравнивают друг друга: $\dot{U}_c + \dot{E}_0 = 0$.

Порядок следования фаз, равенство частот и напряжений сети и генератора и фазовый сдвиг между \dot{U}_c и \dot{E}_0 определяются синхроскопом СН (рис. 4.47). При правильном чередовании фаз сети и генератора лампы на рис. 4.47 гаснут

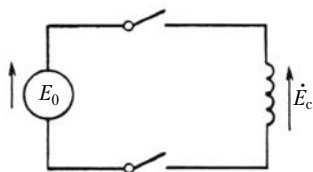


Рис. 4.46. Контур сеть — машина:

E_0 — ЭДС генератора;
 E_c — ЭДС сети

одновременно. Если чередование фаз не соблюдается, на лампах имеет место бегающий огонь, когда лампы попеременно зажигаются и гаснут. Равенство напряжений и сети фиксируется вольтметром, о расхождении напряжений можно также судить по яркости ламп. Расхождение частот сети и генератора можно определить

по частоте мигания ламп. Схема с лампами используется при включении на параллельную работу синхронных генераторов в лабораториях учебных заведений, на станциях используются специальные приборы.

На электростанциях широко применяется способ грубой синхронизации или самосинхронизации синхронных генераторов СГ. При этом способе включения генераторов на параллельную работу частота вращения невозбужденного генератора доводится до примерно синхронной, а затем генератор подключается к сети при быстром вслед за этим включением возбуждения. После этого синхронный генератор сам втягивается в синхронизм под действием синхронизирующего момента.

При самосинхронизации имеют место сложные электро-механические переходные процессы. Кратковременно в обмотках машины протекают переходные токи, превышающие номинальные значения, что сопровождается механическими воздействиями на обмотки и муфту, соединяющую генератор с турбиной.

Способом самосинхронизации включают на параллельную работу генераторы мощностью до 500 МВт. Влияние переходных процессов на надежность машин учитывается при проектировании синхронных генераторов.

При самосинхронизации сокращается время, необходимое для подключения генератора к сети, а это важно для обеспечения надежной и экономичной работы энергосистемы.

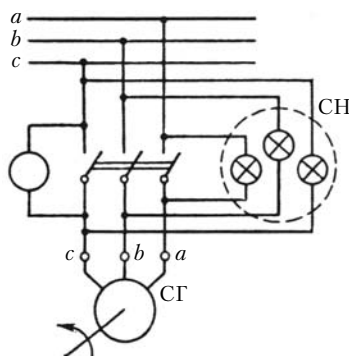


Рис. 4.47. Схема включения синхронной машины на параллельную работу с сетью

4.13. Угловая характеристика.

Синхронизирующая мощность.

Регулирование реактивной мощности

Переходя к изучению характеристик синхронных машин, работающих параллельно с сетью бесконечной мощности, следует иметь в виду, что они принципиально отличаются от характеристик автономной синхронной машины.

По формуле (4.74) может быть построена угловая характеристика $P_{\text{эм}} = f(\theta)$ (рис. 4.49). Из угловой характеристики следует, что максимум электромагнитной мощности имеет место при $\theta = 90^\circ$:

$$P_{\text{эм max}} = mU \frac{E_0}{x_c} \quad (4.76)$$

и соответственно максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{эм max}} = \frac{MU E_0}{\omega_c x_c}. \quad (4.77)$$

Максимальная электромагнитная мощность $P_{\text{эм max}}$ определяет предел статической устойчивости машины, т.е. ее способность оставаться в синхронизме. Увеличение нагрузки за пределом статической устойчивости приводит к выпадению машины из синхронизма.

На угловой характеристике от угла θ , равного нулю, до $\theta = 90^\circ$ расположена устойчивая часть характеристики, а в пределах угла от 90 до 180° — неустойчивая часть характеристики.

Работа синхронной машины устойчива, если положительному (отрицательному) приращению $\Delta\theta$ соответствует положительное (отрицательное) приращение $P_{\text{эм}}$, т.е.

$$\frac{\Delta P_{\text{эм}}}{\Delta\theta} > 0.$$

Полнее это характеризует удельная синхронизирующая мощность, — первая производная $P_{\text{эм}}$ по углу (Вт/рад):

$$P_c = \frac{dP_{\text{эм}}}{d\theta} = mU \frac{E_0}{x_c} \cos \theta. \quad (4.78)$$

Зависимость синхронизирующей мощности от угла θ показана на рис. 4.49 штриховой линией. Синхронизирующая мощность удерживает машину в синхронизме. Она обеспечивает упругую связь машины с сетью.

Синхронизирующая мощность максимальна, когда $P_{\text{эм}} = 0$. Когда машина находится на пределе статической устойчи-

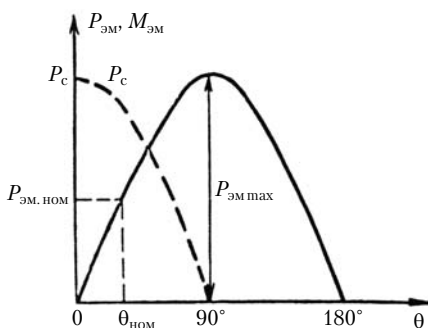


Рис. 4.49. Угловая характеристика неявнополюсной синхронной машины

ности, т.е. электромагнитная мощность равна своему максимальному значению, $P_c = 0$. Если запас синхронизирующей мощности равен нулю, машина выпадает из синхронизма и перестает работать как синхронный генератор. При выпадении из синхронизма $\omega_p \neq \omega_c$ и наступает асинхронный режим. В асинхронном режиме синхронной машины должно быть снято возбуждение и этот режим для синхронных машин допускается кратковременно.

Номинальная нагрузка синхронных генераторов обычно рассчитывается при угле $\theta \approx 20 \div 30^\circ$. Поэтому кратковременно машина может работать при 1,5–2-кратном увеличении нагрузки, не выпадая из синхронизма. Отношение $\frac{P_{\text{эм max}}}{P_{\text{эм, ном}}}$ называется статической перегружаемостью синхронной машины. Статическая перегружаемость

$$k_{\text{п}} = \frac{P_{\text{эм max}}}{P_{\text{эм, ном}}} = \frac{mU_{\text{ном}} \frac{E_0}{x_d}}{mU_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} = \text{ОКЗ} \frac{I_{f\text{ном}}}{I_{f0} \cos \varphi_{\text{ном}}}, \quad (4.79)$$

где $\frac{E_0}{x_d} = I_{\text{к. ном}}$.

Выражение (4.79) получено при условии, что сопротивление обмотки якоря равно нулю и не учитывается насыщение.

Статическая перегружаемость турбогенераторов мощностью до 300 МВт должна быть не менее 1,7, а для турбогенераторов мощностью 500–1200 МВт — не менее 1,6. Статическая перегружаемость гидрогенераторов — не ниже 1,7.

Статическая перегружаемость тем больше, чем больше ОКЗ, т.е. чем меньше x_d или чем больше воздушный зазор.

Чтобы регулировать активную мощность синхронного генератора при параллельной работе его с сетью, необходимо изменять момент на его валу.

Регулирование реактивной мощности в энергосистемах имеет такое же важное значение, как и активной мощности. Реактивная мощность необходима для создания магнитных полей в электротехнических устройствах энергосистемы, и распределение ее в установившихся и переходных процессах во многом определяет устойчивую работу энергосистемы.

Поле в синхронной машине, работающей параллельно с сетью, создается обмоткой возбуждения и реактивными токами, протекающими в обмотке якоря. Результирующее

поле, как это очевидно из векторной диаграммы рис. 4.48, определяется МДС обмотки якоря и обмоткой возбуждения. При изменении тока в обмотке возбуждения изменяется \dot{E}_0 , что приводит к изменению реактивного тока, замыкающегося в контуре сеть — машина.

При увеличении тока в обмотке возбуждения (перевозбуждении машины) вектор \dot{U}_c не будет уравнивать \dot{E}_0 и появится «избыточная» ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{U}_c + \dot{E}_0$ (рис. 4.50, а), которая вызовет появление реактивного тока

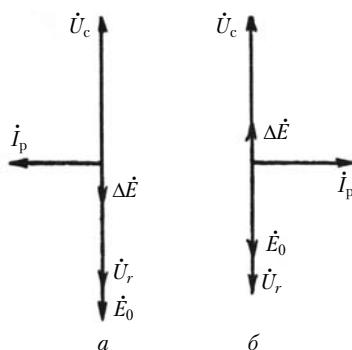


Рис. 4.50. Векторные диаграммы при регулировании реактивной мощности

$$\dot{I}_p = -j \frac{\Delta \dot{E}}{x_c}, \quad (4.80)$$

где \dot{I}_p — реактивный ток, отстающий от $\Delta \dot{E}$ и напряжения генератора \dot{U}_r .

По отношению к напряжению сети \dot{I}_p — опережающий ток.

При уменьшении тока возбуждения (недовозбуждения машины) $\dot{U}_c < \dot{E}_0$ (рис. 4.50, б) и реактивный ток \dot{I}_p отстает от напряжения сети.

Недовозбужденная синхронная машина по отношению к сети является индуктивностью и «потребляет» из сети реактивную мощность.

В перевозбужденном синхронном генераторе, работающем параллельно с сетью, реакция якоря размагничивающая. Реактивные токи, протекающие в обмотках якоря, размагничивают машину и напряжение — $-\dot{U}_r = \dot{U}_c$. При недовозбуждении реакция якоря — подмагничивающая, реактивные токи, протекающие в обмотках якоря, подмагничивают машину и напряжение на генераторе по модулю равно напряжению сети.

Зависимость тока якоря от тока возбуждения $I = f(I_f)$. При $U_c = \text{const}$ и постоянной активной мощности P называется U-образной характеристикой (рис. 4.51).

При увеличении тока возбуждения от минимального значения сначала ток в обмотке якоря уменьшается, дохо-

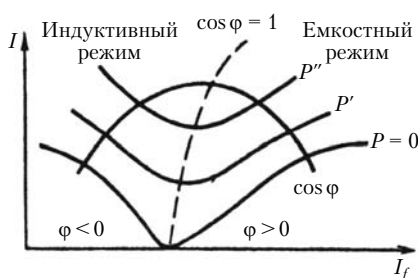


Рис. 4.51. U-образные характеристики

дит до минимального значения, а затем возрастает. При недовозбуждении в обмотке якоря протекает реактивный ток, подмагничивающий машину. При минимальном значении тока в обмотке якоря $\cos \varphi = 1$. При этом в обмотке якоря протекает активный ток, а магнитное поле в машине

создается только обмоткой возбуждения. При дальнейшем увеличении тока возбуждения снова возрастает ток в яcore, реактивный ток в обмотках якоря создает размагничивающую реакцию якоря. Перевозбужденная машина по отношению к сети является емкостью. Она выдает в сеть реактивную мощность.

На рис. 4.51 представлено семейство U-образных характеристик, причем $P'' > P' > P = 0$. Границы работы недовозбужденной машины определяются ее статической устойчивостью, а перевозбужденной — перегрузочной способностью.

Возможность регулирования реактивной мощности путем изменения тока обмотки возбуждения является одним из основных достоинств синхронной машины.

Одним из важных показателей, характеризующих синхронную машину, является зарядная мощность:

$$S_3 = mU_{\text{ном}} I_3 = \frac{mU_{\text{ном}}^2}{x_d}, \quad (4.81)$$

где I_3 — зарядный ток, создающий при работе на емкостную нагрузку, при отключенной обмотке возбуждения, номинальное напряжение на выводах генератора.

Емкостной нагрузкой является разомкнутая линия электропередачи. Подключенный к разомкнутой линии синхронный генератор не должен самовозбуждаться при $I_f = 0$. Условие отсутствия самовозбуждения: зарядная мощность линии должна быть меньше зарядной мощности генератора, $S_{3л} < S_{3г}$. Чем больше воздушный зазор машины, т.е. чем меньше x_d , тем больше $S_{3г}$. Генератор с меньшим значением x_d может подключаться к более длинным линиям электропередачи.

4.14. Электромагнитная и синхронизирующая мощности явнополюсной синхронной машины

В процессах преобразования энергии в явнополюсной синхронной машине, благодаря различию индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям машины, имеются некоторые особенности. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины при $r_a = 0$ дана на рис. 4.52. В этой диаграмме ток в якоре представлен как сумма токов по продольной и поперечной осям машины:

$$I_a \cos \psi = I_q; \quad I_a \sin \psi = I_d. \quad (4.82)$$

Из векторной диаграммы

$$\begin{aligned} P_{\text{эм}} &= mIU_a \cos \phi = mUI_a \cos(\psi - \theta) = \\ &= mU(I_a \cos \psi \cos \theta + I_a \sin \psi \sin \theta) = mU(I_q \cos \theta + I_d \sin \theta); \end{aligned} \quad (4.83)$$

$$I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}; \quad I_d = \frac{E_0 - U \cos \theta}{x_d}. \quad (4.84)$$

Подставляя значения токов I_q и I_d в выражение (4.83), получаем

$$P_{\text{эм}} = \frac{mU^2}{x_q} \sin \theta \cos \theta + \frac{mE_0 U}{x_d} \sin \theta - \frac{mU^2}{x_d} \sin \theta \cos \theta. \quad (4.85)$$

Так как $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$, то

$$P_{\text{эм}} = mU \frac{E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (4.86)$$

Из выражения (4.86) следует, что для явнополюсной синхронной машины электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм}} = \frac{mU}{\omega_c} \frac{E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (4.87)$$

$P_{\text{эм}}$ и $M_{\text{эм}}$ в явнополюсной машине зависят не только от возбуждения, но и от различия параметров по продольной и поперечной осям машины.

Угловая характеристика явнополюсной синхронной машины представлена на рис. 4.53. Мощность $P_{\text{эм}}$ имеет две

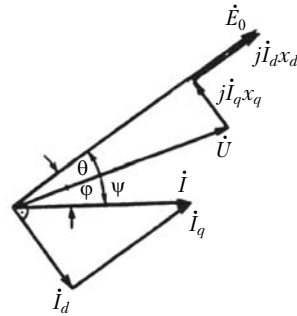


Рис. 4.52. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины при параллельной работе с сетью

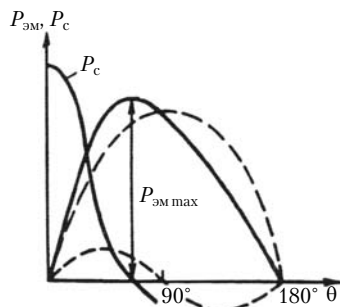


Рис. 4.53. Угловая характеристика явнополюсного синхронного генератора

составляющие, изменяющиеся по закону $\sin \theta$ и $\sin 2\theta$. Вторая составляющая создает реактивный момент. Перегрузочная способность в явнополюсной машине за счет реактивной составляющей выше, чем в неявнополюсной машине. Однако угол θ , при котором имеет место $P_{эм \max}$, меньше и равен $70\text{--}80^\circ$.

Удельная синхронизирующая мощность явнополюсной синхронной машины равна

$$P_c = \frac{dP_{эм}}{d\theta} = mU \frac{E_0}{x_d} \cos \theta + mU^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta. \quad (4.88)$$

Зависимость синхронизирующей мощности явнополюсной машины от угла нагрузки показана на рис. 4.53. Как и $P_{эм}$, синхронизирующая мощность имеет максимальное значение большее, чем у неявнополюсной машины. Явнополюсная машина по сравнению с неявнополюсной (см. рис. 4.53) выпадает из синхронизма при меньшем угле θ . Из-за реактивного момента, обусловленного различием магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям, явнополюсная машина при небольших нагрузках может удерживаться в синхронизме при отсутствии возбуждения. При этом первый член в формуле (4.87) равен нулю и остается лишь реактивная составляющая (см. рис. 4.53), которая при малых нагрузках удерживает машину в синхронизме. Образование реактивного момента поясняет рис. 4.54.

Несимметричный ротор стремится занять положение, при котором энергия магнитного поля будет максимальна, зазор при этом минимален. Ротор в виде цилиндра нейтрален к положению в магнитном поле.

У-образные характеристики явнополюсной машины имеют тот же вид, что и у неявнополюсной машины.

Рассмотренные характеристики синхронных машин относились к параллельной работе синхронной машины параллельно с сетью бесконечной мощности. Параллельная

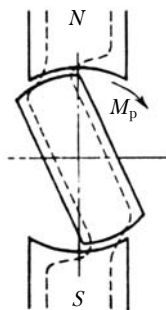


Рис. 4.54. Образование реактивного момента

работа двух или нескольких машин соизмеримой мощности для анализа сложнее, так как изменяются и напряжение, и частота на шинах генераторов. Регулирование нагрузки или возбуждения на одном из генераторов вызывает изменение режима работы другого генератора и появление уравнительных токов. Параллельная работа двух или нескольких генераторов имеет место в автономных энергосистемах.

4.15. Синхронные двигатели

Синхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы, т.е. они могут работать как в двигательном, так и генераторном режимах. Однако электропромышленность выпускает синхронные машины, предназначенные для работы только в генераторном или только в двигательном режиме, так как особенности работы машины в том или ином режиме предъявляют различные требования к конструкции машины.

Синхронные двигатели чаще работают в пусковых режимах и должны развивать больший пусковой момент, чем генераторы. Это накладывает определенные условия на конструкцию ротора: демпферную (пусковую) обмотку синхронных двигателей рассчитывают на большие токи и более длительный режим.

Для возбуждения синхронных двигателей используется электромашинная система возбуждения или тиристорная система возбуждения. В электромашинных системах возбуждения якорь возбудителя — генератора постоянного тока — соединяется с валом синхронного двигателя жестко или в тихоходных машинах — через клиноременную передачу, которая обеспечивает увеличение частоты вращения возбудителя и снижение его массы. Системы возбуждения синхронных двигателей принципиально не отличаются от систем возбуждения генераторов и подробно рассматриваются в параграфе 4.22.

Уравнения синхронного двигателя отличаются от уравнений синхронного генератора (4.1)–(4.3) лишь тем, что в них изменяется знак момента сопротивления.

Чтобы из генераторного режима перейти в двигательный, надо изменить знак момента сопротивления, приложенного к валу синхронной машины. Тогда изменятся знак угла θ и направление активной мощности; машина начнет потреблять мощность из сети.

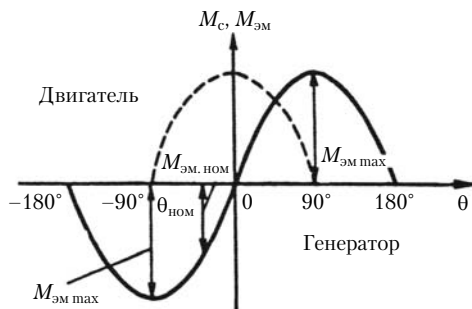


Рис. 4.55. Угловая характеристика синхронной машины

На угловой характеристике (рис. 4.55) область двигательного режима находится в зоне отрицательных углов θ . Устойчивой частью угловой характеристики в двигательном режиме является область от 0 до -90° . Номинальный момент, соответствующий $\theta_{\text{ном}}$, находится в области $20\text{--}30^\circ$. Двигатель с неявнополюсным ротором имеет максимум момента при $\theta = -90^\circ$:

$$M_{\text{эм max}} = \frac{P_{\text{эм max}}}{\omega_c} = \frac{mU}{\omega_c} \frac{E_0}{x_d}. \quad (4.89)$$

Максимальный момент зависит от размера воздушного зазора двигателя. Чем больше зазор, тем меньше x_d и больше $M_{\text{эм max}}$. Однако при большом зазоре растут габариты машины. Предел статической устойчивости

$$k_{\text{п}} = \frac{M_{\text{эм max}}}{M_{\text{эм. ном}}}. \quad (4.90)$$

Удельный синхронизирующий момент, как и в генераторном режиме, максимален при $\theta = 0$ и равен нулю при $\theta = 90^\circ$.

Для явнополюсного двигателя зависимость $M_c, M_{\text{эм}} = f(\theta)$ имеет такой же вид, как и для генератора (см. рис. 4.53), но располагается в зоне отрицательных углов θ .

У-образные характеристики синхронных двигателей имеют тот же вид, что и для генераторов (см. рис. 4.51). При перевозбуждении синхронный двигатель по отношению к сети является емкостью, недо возбужденный двигатель потребляет из сети реактивную мощность, являясь по отношению к сети индуктивностью. При недо возбуждении реакция якоря в синхронном двигателе — подмагничивающая, при перевозбуждении — размагничивающая.

Важное значение для исследования процессов преобразования энергии в синхронных двигателях имеют рабочие характеристики (рис. 4.56). С ростом нагрузки на валу двигателя увеличиваются момент и ток в якоре, сначала по линейному закону, а затем из-за изменения параметров — по нелинейному закону. Если не изменяется $I_f \cos \varphi$ может падать, расти или иметь максимум. Это зависит от значения I_f и может быть прослежено по U-образным характеристикам: при увеличении P_2 — переходе с одной U-образной характеристики на другую $\cos \varphi$ изменяется, так как из-за внутреннего падения напряжения кривая $\cos \varphi = 1$ смещается в область больших нагрузок (см. рис. 4.51). При изменении I_f можно получить постоянное значение $\cos \varphi$ при разных P_2 (рис. 4.57). Кривая 1 на рис. 4.57 соответствует работе синхронного двигателя на постоянном токе возбуждения в зоне недо возбуждения на U-образных характеристиках, кривая 2 — работе синхронного двигателя с перевозбуждением; кривая 3 возможна при регулировании тока возбуждения.

Зависимость КПД от нагрузки такая же, как и для всех электрических машин.

Характерным отличием синхронных двигателей является постоянство частоты вращения при изменении нагрузки. Синхронные двигатели имеют предельно жесткие механические характеристики.

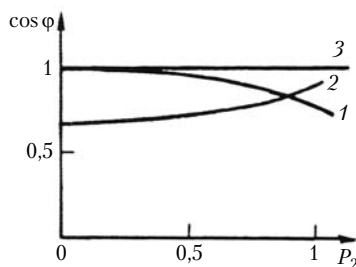


Рис. 4.57. Зависимости $\cos \varphi$ синхронного двигателя от нагрузки

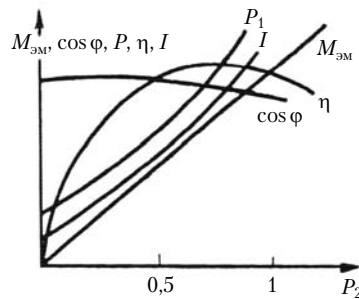


Рис. 4.56. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Одним из основных недостатков синхронных двигателей являются плохие пусковые свойства, которые ограничивают их применение. Пуск синхронных двигателей может быть частотным, при помощи разгонного двигателя или синхронные двигатели могут включаться на полное напряжение сети (асинхронный пуск). Наиболее распро-

страненным является асинхронный пуск. Вследствие наличия короткозамкнутых контуров на роторе (демпферной обмотки, массивных полюсных наконечников) ротор разгоняется до частоты вращения, близкой к синхронной. Обмотка возбуждения при асинхронном пуске закорачивается на активное сопротивление. После подхода ротора к частоте вращения, близкой к синхронной ($s \approx 0,05$), обмотка возбуждения подключается к возбудителю и осуществляется грубая синхронизация машины.

Применяется также пуск с наглухо присоединенным возбудителем. В этом случае при частоте вращения, равной $(0,5 \div 0,7)n_{\text{ном}}$, в обмотке возбуждения синхронного двигателя начинает протекать постоянный ток и машина втягивается в синхронизм. Пуск двигателя с наглухо присоединенным возбудителем сопровождается большими бросками токов и может осуществляться, если нагрузка не превышает $(0,4 \div 0,5)M_{\text{ном}}$. Однако схема пуска с наглухо присоединенным возбудителем более простая и находит все большее применение.

При тяжелых условиях пуска мощных синхронных двигателей применяется реакторный или автотрансформаторный пуск по схемам, рассмотренным для асинхронных двигателей (см. параграф 3.14).

При пуске синхронного двигателя с помощью разгонного двигателя синхронный двигатель доводится до почти синхронной частоты вращения. В качестве разгонного двигателя может использоваться асинхронный двигатель, имеющий большую, чем синхронный, синхронную частоту вращения, или двигатель постоянного тока, если есть сеть постоянного тока. Пуск с помощью разгонного двигателя применяется редко, так как разгонный двигатель используется только при пуске.

При частотном пуске обмотка статора синхронного двигателя подключается к преобразователю частоты, который изменяет частоту от нескольких герц до номинальной частоты. При частотном пуске синхронный двигатель входит в синхронизм при малых частотах. Частотный пуск удобно использовать, если преобразователь частоты можно применять для пуска нескольких двигателей.

Сравнивая синхронные двигатели с асинхронными, следует отметить основное преимущество синхронных двигателей — возможность работать с $\cos \varphi = 1$, а при перевозбуждении — и с опережающим $\cos \varphi$.

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален U , а асинхронного — U^2 . Поэтому синхронные двигатели менее чувствительны к изменению напряжения сети и имеют большую перегрузочную способность. Регулирование потока возбуждения путем изменения тока возбуждения обеспечивает регулирование реактивной мощности при падении напряжения и уменьшении частоты сети.

Недостатком синхронных двигателей являются их более сложная конструкция, необходимость в источнике постоянного тока и худшие по сравнению с асинхронными пусковые свойства.

При мощности двигателей от нескольких киловатт до 100 кВт проявляется еще один недостаток синхронных двигателей — склонность к качаниям. При определенном соотношении параметров синхронных двигателей ротор покачивается около синхронной частоты вращения.

Синхронные двигатели при условии легких пусков целесообразно применять при мощности свыше 200 кВт. Области применения синхронных двигателей непрерывно расширяются, и их мощности возрастают до 50 МВт.

Синхронные двигатели мощностью до 1–2 кВт выполняются с явнополюсным ротором без обмотки возбуждения. За счет различия проводимости по продольной и поперечной осям машины в таких машинах возникает реактивный момент, а асинхронный пуск обеспечивается демпферной обмоткой.

На рис. 4.58 показаны две наиболее распространенные конструкции роторов синхронных реактивных двигателей. Четырехполюсная конструкция ротора (рис. 4.58, а) имеет стальной шихтованный явнополюсный магнитопровод 1 и демпферную обмотку 2. Двухполюсный шихтованный ро-

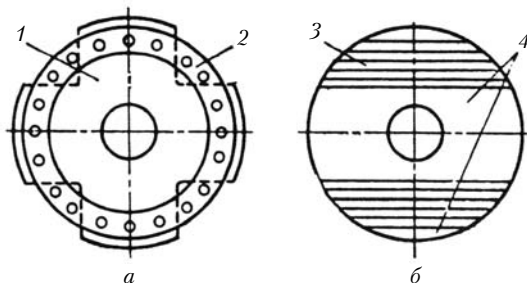


Рис. 4.58. Конструкции роторов синхронных реактивных двигателей

тор, залитый алюминием, дан на рис. 4.58, б. Сердечник ротора 3 заливается алюминием 4, который скрепляет сердечник и образует демпферную обмотку.

Реактивные двигатели имеют низкие $\cos \varphi$ и КПД ($\eta = 0,3 \div 0,4$), их масса больше, чем у обычных трехфазных асинхронных двигателей.

Вместо электромагнитного возбуждения можно применять постоянные магниты. Серии двигателей с постоянными магнитами выпускаются на мощности от десятков ватт до нескольких киловатт. Они имеют лучшие энергетические показатели по сравнению с реактивными.

Для обеспечения пускового момента двигатели с постоянными магнитами имеют пусковую обмотку в виде беличьей клетки, залитой алюминием. Ротор из магнитотвердого материала изготавливается путем литья из специальных сплавов. Этот процесс трудоемкий, поэтому ротор имеет высокую стоимость.

4.16. Синхронный компенсатор

Для создания магнитных полей в электротехнических устройствах энергосистем необходима реактивная мощность. Основными источниками реактивной мощности являются синхронные машины и конденсаторы. Конденсаторы дороже синхронных машин, имеют большие габариты и меньшую надежность, хотя и являются статическими устройствами. Источники реактивной мощности желательно иметь ближе к месту потребления реактивной мощности. Поэтому невыгодно использовать синхронные генераторы в качестве источников реактивной мощности, так как реактивные токи загружают линии электропередачи и синхронные генераторы.

Целесообразно в качестве источников реактивной мощности использовать синхронные машины, работающие как источники или потребители реактивной мощности. Такие машины называются синхронными компенсаторами.

Конструктивно синхронные компенсаторы выполняются так же, как синхронные генераторы. Отличие состоит в том, что они не имеют выходного конца вала. Мощность синхронных компенсаторов 10–345 МВ·А при напряжении 6,6–15,75 кВ, частота вращения 750–1000 об/мин. Наиболее распространенное исполнение — горизонтальное с явнополюсным ротором. Так как вал не передает вращающего момента,

он может иметь меньший диаметр, что дает возможность уменьшить размеры подшипников. Отсутствие выходного конца вала облегчает герметизацию машины, поэтому в синхронных компенсаторах широко применяется водородное охлаждение.

Уравнения синхронного компенсатора отличаются от уравнений синхронного двигателя лишь тем, что в них $M_c = 0$ (если пренебречь механическими потерями).

Векторные диаграммы синхронного компенсатора при недовозбуждении и перевозбуждении показаны на рис. 4.59, а, б. Индуктивное сопротивление синхронного компенсатора $x_{ск}$ можно принять равным x_d .

У-образная характеристика синхронного компенсатора (рис. 4.60) не отличается от соответствующей характеристики синхронного двигателя при $P_a = 0$. Ток синхронного компенсатора имеет небольшую активную составляющую, которая идет на покрытие потерь в компенсаторе. Энергия, которая идет на покрытие механических потерь, потерь в стали и меди, забирается из сети. По отношению к номинальной мощности синхронного компенсатора активная мощность составляет не более 1–2%.

При недовозбуждении синхронный компенсатор по отношению к сети является индуктивностью, а при перевозбуждении — емкостью.

В случае снижения напряжения сети синхронный компенсатор при $I_f = \text{const}$ отдает в сеть большую реактивную мощность, чем при номинальном напряжении. При повышении напряжения сети выше номинального значения синхронный компенсатор уменьшает отдачу в сеть реактивной мощ-

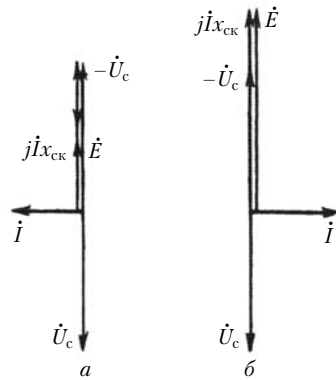


Рис. 4.59. Векторные диаграммы синхронного компенсатора

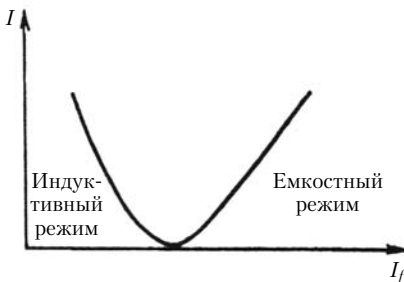


Рис. 4.60. У-образная характеристика синхронного компенсатора при $U_c = \text{const}$

ности. При автоматическом регулировании тока в обмотке возбуждения стабилизирующие свойства синхронного компенсатора улучшаются.

Полная номинальная мощность синхронного компенсатора

$$S_{\text{ном}} = mU_{\text{ном}}I_{\text{ном}}. \quad (4.91)$$

Она имеет место при работе компенсатора с перевозбуждением. Наибольшее значение мощности и тока в статоре при недовозбуждении имеет место при токе возбуждения, равном нулю, когда $\dot{E} = 0$. В этом случае из векторной диаграммы (см. рис. 4.59)

$$\dot{I} = j \frac{U_{\text{ном}}}{x_d}$$

и полная мощность при недовозбуждении

$$S = m \frac{U_{\text{ном}}^2}{x_d}. \quad (4.92)$$

Синхронные компенсаторы работают при угле нагрузки $\theta \approx 0$, и нет необходимости заботиться об их статической перегружаемости. Так как в обмотках синхронного компенсатора протекают реактивные токи, которые не создают динамических усилий, крепление лобовых частей менее прочное, чем в турбогенераторах. Для снижения тока возбуждения синхронные компенсаторы обычно выполняются с несколько меньшими воздушными зазорами, чем синхронные двигатели, поэтому у синхронных компенсаторов $x_d = 1,8 \div 2,5$.

Рациональное распределение реактивной мощности в сетях между синхронными компенсаторами, генераторами, конденсаторами и двигателями имеет важное технико-экономическое значение.

4.17. Несимметричная нагрузка трехфазных генераторов

Несимметричная нагрузка имеет место при неравномерном включении по фазам нагрузки, что приводит к различию токов в фазах генератора. Обычно это получается при включении однофазной нагрузки (электрических печей, тяговых подстанций, осветительной нагрузки) в трехфазную сеть, а также при несимметричных коротких замыканиях.

При исследовании установившихся несимметричных режимов симметричных синхронных машин применяют метод симметричных составляющих. Несимметричную трех-

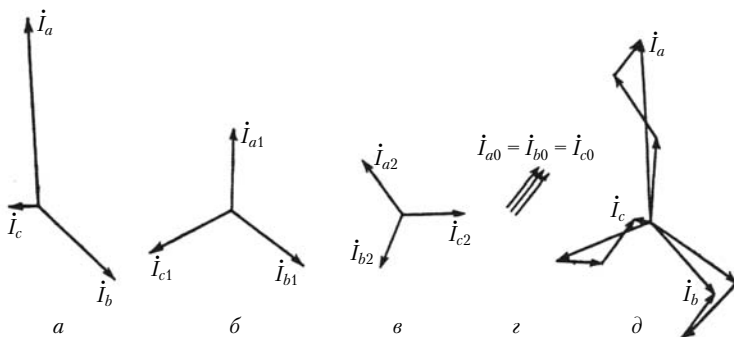


Рис. 4.61. Несимметричная трехфазная система, состоящая из трех симметричных

фазную систему токов можно представить состоящей из трех симметричных систем (рис. 4.61, а):

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}, \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0}, \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0}, \end{cases} \quad (4.93)$$

где $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$ — токи симметричной системы токов прямой последовательности (рис. 4.61, б); $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$ — токи симметричной системы токов обратной последовательности (рис. 4.61, в); $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$ — токи нулевой последовательности (рис. 4.61, г).

Складывая векторы симметричных составляющих тока прямой, обратной и нулевой последовательностей, получаем несимметричную систему (рис. 4.61, д).

Токи различных последовательностей из системы (4.93) через несимметричные фазные токи выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c), \\ \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c), \\ \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c), \\ \dot{I}_{b1} = \dot{I}_{a1}a^2, \quad \dot{I}_{c1} = \dot{I}_{a1}a, \\ \dot{I}_{b2} = \dot{I}_{a2}a; \quad \dot{I}_{c2} = \dot{I}_{a2}a^2, \\ \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_{a0}, \end{cases} \quad (4.94)$$

где $a = e^{j120^\circ}$.

В симметричных электрических машинах при несимметричных нагрузках подобные же соотношения связывают несимметричные фазные напряжения $(\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c)$ с их симметричными составляющими $(\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2)$.

В симметричных машинах напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей связаны законом Ома с симметричными составляющими токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ (индексы фаз здесь и далее опущены):

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_0 + \dot{I}_1 z_1; \quad (4.95)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_2; \quad (4.96)$$

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_0, \quad (4.97)$$

где z_1, z_2, z_0 — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей синхронной машины.

Поля в воздушном зазоре от токов прямой и обратной последовательностей вращаются в противоположные стороны и электромагнитные связи с ротором оказываются различными. Обычно при расчетах считают, что обмотка возбуждения разомкнута, а при проведении опытов — закорачивается на сопротивление. Поле нулевой последовательности отличается от полей прямой и обратной последовательностей, оно создает в зазоре пульсирующее поле, близкое к полю рассеяния трехфазной обмотки. Поэтому в синхронных машинах сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей отличаются друг от друга.

Токи прямой последовательности создают в зазоре рабочее поле, вращающееся синхронно с ротором. При симметричной нагрузке существуют только токи прямой последовательности. Индуктивными сопротивлениями прямой последовательности явнополюсной синхронной машины являются сопротивления x_d и x_q , а для неявнополюсной x_c .

Сопротивление прямой последовательности включает активное сопротивление r_1 фазы обмотки якоря и для неявнополюсной машины равно

$$z_1 = r_1 + jx_c, \quad (4.98)$$

а для явнополюсной машины

$$z_{1d} = r_1 + jx_d; \quad (4.99)$$

$$z_{1q} = r_1 + jx_q, \quad (4.100)$$

где z_{1d}, z_{1q} — сопротивления прямой последовательности по осям d и q .

Токи обратной последовательности создают в воздушном зазоре поле, вращающееся в сторону, противоположную вращению ротора с синхронной частотой вращения и скольжением $s = 2$. Сопротивление обратной последовательности

$$z_2 = r_2 + jx_2, \quad (4.101)$$

где r_2 , x_2 — активное и индуктивное сопротивления обратной последовательности.

Активное сопротивление $r_2 > r_1$, так как в r_2 входит и составляющая потеря в роторе из-за протекания токов обратной последовательности в контурах ротора. Активное сопротивление обратной последовательности определяется по потерям, которые при наличии обратной последовательности больше в основном за счет электрических потерь в демпферной обмотке.

Индуктивное сопротивление обратной последовательности $x_2 \ll x_1$. Токи обратной последовательности в демпферной обмотке имеют частоту $f_2 = 2f_1$ и создают поле, неподвижное относительно поля обратной последовательности статора. Токи обратной последовательности ротора ослабляют поле обратной последовательности статора, тем самым уменьшая несимметрию.

Индуктивное сопротивление обратной последовательности близко к индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки якоря $x_2 \approx x_{\sigma a}$. Сопротивление x_2 примерно равно сверхпереходному сопротивлению, которое рассматривается в параграфе 4.19.

Опытным путем сопротивление обратной последовательности определяется при вращении ротора с синхронной частотой вращения против поля. При этом измеряются симметричные напряжения и токи в статоре и потери. Зная r_1 и потери, определяют r_2 . Делением фазного напряжения на ток находят z_2 , а затем определяют $x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}$.

В явнополюсных синхронных машинах сопротивления обратной последовательности по продольной и поперечной осям отличаются друг от друга: $z_{2d} \neq z_{2q}$. При определении z_2 явнополюсной синхронной машины можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{i}_{2d} + \dot{i}_{2q}}{2} = -\frac{\dot{U}_2}{2} \left[\frac{1}{z_{2d}} + \frac{1}{z_{2q}} \right], \quad (4.102)$$

где \dot{I}_2 — средний ток, который может быть определен опытным путем при вращении ротора против поля, когда можно считать, что статор подключен к сети бесконечной мощности. Из выражения (4.102) следует

$$z_2 = r_2 + jx_2 = -\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \frac{2z_{2d}z_{2q}}{z_{2d} + z_{2q}}. \quad (4.103)$$

В современных синхронных неявнополюсных машинах в относительных единицах $x_2 = 0,12 \div 0,18$, в явнополюсных $x_2 = 0,2 \div 0,4$. Обычно $r_2 \ll x_2$ и z_2 в относительных единицах можно считать равным x_2 .

Токи нулевой последовательности — переменные токи частоты сети, совпадающие по фазе. Они создают в воздушном зазоре синхронной машины, так же как и в асинхронных машинах, пульсирующее поле 3-й пространственной гармоники и поля, кратные 3-й гармонике (рис. 4.62). Поле нулевой последовательности наводит в демпферной обмотке токи нулевой последовательности. Поле нулевой последовательности не создает вращающего момента.

Сопротивление нулевой последовательности

$$z_0 = r_0 + jx_0, \quad (4.104)$$

где r_0 , x_0 — активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности.

Активное сопротивление r_0 несколько больше активного сопротивления обмотки якоря из-за потерь от токов нулевой последовательности в демпферной обмотке. Можно считать, что $r_0 \approx r_a$.

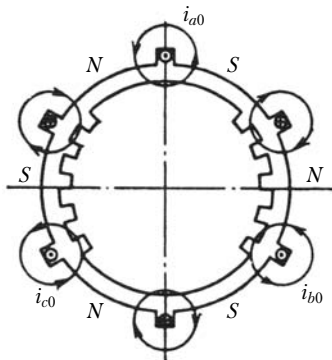


Рис. 4.62. Поле и токи нулевой последовательности

Индуктивное сопротивление x_0 определяется полями рассеяния обмотки якоря и $x_0 \approx x_{\sigma a}$. Из-за укорочения шага в двухслойных обмотках x_0 несколько меньше $x_{\sigma a}$.

В относительных единицах в неявнополюсных синхронных машинах $x_0 = 0,05 \div 0,16$, в явнополюсных $0,07 \div 0,1$.

Сопротивления нулевой последовательности опытным путем определяют при соединении последовательно трех

фаз обмоток статора и вращении ротора машины с синхронной скоростью. При этом

$$z_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad (4.105)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad (4.106)$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad (4.107)$$

где U_0 , I_0 , P_0 — соответственно фазное напряжение, ток и потери в фазе.

Обмотки синхронных генераторов обычно соединяют в звезду, а нулевую точку заземляют через большое сопротивление. Поэтому токи нулевой последовательности отсутствуют. Вследствие этого при несимметричной нагрузке существуют поля прямой и обратной последовательностей. Обратная последовательность оказывает значительное влияние на работу синхронной машины.

Токи обратной последовательности, протекающие в контурах ротора, создают потери, снижающие КПД машины. При значительной несимметрии нагрузки может возникнуть недопустимый нагрев демпферной обмотки и массивных частей ротора. Так как обмотка возбуждения имеет большое сопротивление, токи обратной последовательности в ней небольшие и нагрев обмотки возбуждения этими токами небольшой.

В результате взаимодействия потока возбуждения и потока обратной последовательности статора на ротор действуют знакопеременные нагрузки с двойной частотой сети. Эти силы вызывают вибрации и шум машины.

Несимметрия нагрузки приводит к искажению симметрии напряжений, что в свою очередь приводит к увеличению потерь в машине.

Несимметрия нагрузки, при которой допускается длительная работа синхронных машин, ограничивается нагревом и вибрациями машины. Допускается длительная работа турбогенераторов и гидрогенераторов с несимметричной нагрузкой, если токи фаз не превышают номинальных значений и разность токов в фазах не превышает 10% номинального тока фазы.

4.18. Несимметричные короткие замыкания

Несимметричные короткие замыкания являются предельным случаем несимметричной нагрузки. При несимметричных коротких замыканиях установившиеся токи короткого замыкания достигают максимальных значений. Ограничение токов короткого замыкания в крупных энергосистемах является одной из трудных проблем в энергетике. Определение токов короткого замыкания проводим только с учетом сопротивлений синхронной машины.

На рис. 4.63 представлены схемы наиболее распространенных коротких замыканий — однофазного короткого замыкания (рис. 4.63, *а*), двухфазного короткого замыкания (рис. 4.63, *б*) и двойного однофазного короткого замыкания (двухфазного короткого замыкания на нейтраль) (рис. 4.63, *в*).

При однофазном коротком замыкании $U_A = 0$, $I_B = I_C = 0$. Симметричные составляющие токов через ток короткого замыкания фазы *A* определяются следующим образом:

$$\dot{I}_{A0} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{3} = \frac{\dot{I}_A}{3}; \quad (4.108)$$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B a + \dot{I}_C a^2}{3} = \frac{\dot{I}_A}{3}; \quad (4.109)$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B a^2 + \dot{I}_C a}{3} = \frac{\dot{I}_A}{3}. \quad (4.110)$$

Тогда ток однофазного короткого замыкания

$$\dot{I} = \frac{3\dot{E}}{z_1 + z_2 + z_3}. \quad (4.111)$$

Обычно индуктивные сопротивления много больше активных сопротивлений, поэтому можно считать $z_1 = jx_d$; $z_2 = jx_2$; $z_0 = jx_0$. При этих условиях ток короткого замыкания будет чисто индуктивным. Он создает продольную размагничивающую реакцию якоря.

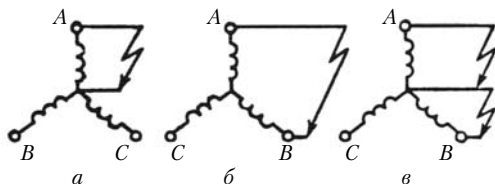


Рис. 4.63. Схемы несимметричных коротких замыканий

При двухфазном коротком замыкании линейное напряжение $\dot{U}_{AB} = 0$ и токи $\dot{I}_B = -\dot{I}_A$, а $\dot{I}_C = 0$ (см. рис. 4.63, б). При этом

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{I}_A}{3}(1-a); \quad \dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A}{3}(1-a^2); \quad \dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B) = 0.$$

Ток двухфазного короткого замыкания

$$\dot{I}_A = \frac{\sqrt{3}\dot{E}}{z_1 + z_2}. \quad (4.112)$$

При двойном однофазном коротком замыкании (см. рис. 4.63, в)

$$\dot{U}_A = 0; \quad \dot{U}_B = 0; \quad \dot{I}_C = 0.$$

При этом

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{I}_A + a\dot{I}_B}{3}; \quad \dot{I}_{A2} = \frac{\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B}{3}; \quad \dot{I}_{A0} = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B}{3}.$$

Тогда

$$\dot{I}_A = \frac{\sqrt{3}\dot{E}\sqrt{z_2^2 + z_0^2 + z_2z_0}}{z_1z_2 + z_0z_1 + z_2z_0}. \quad (4.113)$$

Наибольший установившийся ток в синхронной машине имеет место при однофазном коротком замыкании, а ток двойного однофазного короткого замыкания больше тока симметричного трехфазного короткого замыкания (рис. 4.64), что следует из уравнений (4.111)–(4.113). Это объясняется тем, что размагничивающая реакция якоря максимальная при симметричном трехфазном коротком замыкании и минимальная — при однофазном коротком замыкании. За счет реакции якоря происходят уменьшение поля в зазоре машины и снижение напряжения на выходе машины.

На основании полученных выражений для токов несимметричных коротких замыканий могут быть предложены комплексные схемы замещения, включающие сопротивления различных последовательностей (рис. 4.65, $a-z$). В этих схемах генератор представлен в виде источника ЭДС и последовательно z_1 и параллельно z_0 и z_2 включенных

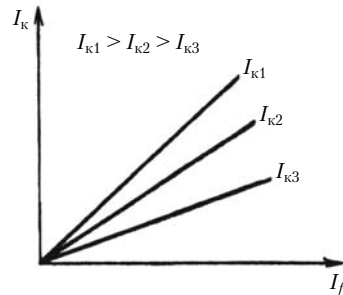


Рис. 4.64. Характеристики несимметричных коротких замыканий

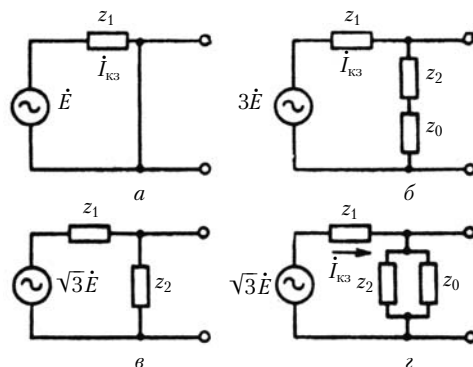


Рис. 4.65. Комплексные схемы замещения несимметричных коротких замыканий:

a — трехфазное; *б* — однофазное; *в* — двухфазное;
г — двухфазное на нейтраль

сопротивлений. По комплексным схемам замещения удобнее считать токи коротких замыканий в сложных системах.

Наиболее опасны для синхронной машины внутренние несимметричные короткие замыкания, когда часть витков обмотки замыкается на корпус или происходит замыкание части витков двух фаз обмотки. Внутренние несимметричные короткие замыкания обычно приводят к пожару обмотки и стали и тяжелой аварии синхронной машины. Гарантией от аварий, связанных с внутренними несимметричными короткими замыканиями, является высококачественное изготовление синхронных машин на электротехнических заводах.

4.19. Переходные процессы в синхронных машинах

Переходные процессы в синхронных машинах возникают при изменении нагрузки, синхронизации машины и различных аварийных режимах. Изучение переходных процессов необходимо для проектирования и эксплуатации синхронных машин.

В параграфе 4.2 рассмотрены дифференциальные уравнения синхронной машины, решение которых дает ответы почти на все вопросы, возникающие в практике. Уравнения (4.1)—(4.8) не имеют аналитического решения. Их можно смоделировать на ЭВМ.

На сегодняшний день теория переходных процессов в синхронных машинах разработана достаточно хорошо. Имеют-

ся стандартные программы, позволяющие исследовать динамику с учетом нескольких полей в воздушном зазоре, нелинейностей и нескольких контуров. Большой вклад в изучение переходных процессов в синхронных машинах внесли советские ученые А. И. Важнов, И. А. Глебов, Е. Я. Казовский, Г. А. Сипайлов, И. И. Трещев и др.

Моделирование уравнений синхронных машин осложняется наличием трех — пяти контуров и различием параметров по осям d и q . Для большинства задач необходимо учитывать изменение параметров в переходных процессах. Исследование динамики синхронных машин на ЭВМ рассматривается в спецкурсах. Ниже переходные процессы в синхронных машинах разбираются качественно, без привлечения дифференциальных уравнений.

Рассмотрим явления при трехфазном коротком замыкании на выводах машины. Симметричное трехфазное короткое замыкание обмотки якоря происходит при работе машины на холостом ходу, а частота вращения, насыщение и напряжение, приложенное к обмотке возбуждения, не изменяются.

При внезапном коротком замыкании можно считать, что потокосцепление обмотки якоря остается неизменным. Активное сопротивление обмотки якоря значительно меньше индуктивного, поэтому в уравнении

$$-\frac{d\Psi}{dt} = ri \quad (4.114)$$

при $r = 0$

$$\frac{d\Psi}{dt} = 0$$

и $\Psi = \text{const.}$

В первый момент короткого замыкания ток якоря создает магнитный поток, который начинает проникать в ротор. Исходя из постоянства потокосцепления при изменении тока в статоре можно сделать вывод, что в обмотках ротора возникает дополнительный ток, препятствующий проникновению потока статора в ротор.

На рис. 4.66 показано два состояния, качественно характеризующих процессы в синхронной машине по оси d при переходном процессе. При изменении тока в якоре в первый момент демпферная обмотка препятствует проникновению

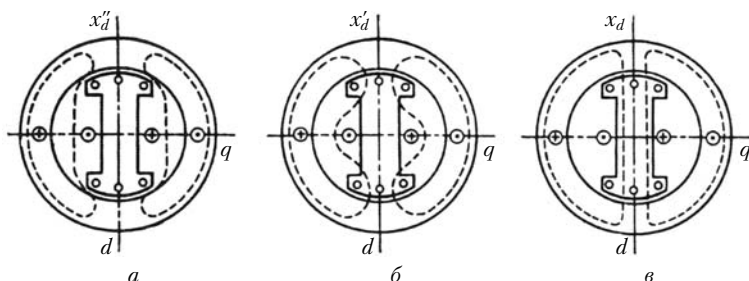


Рис. 4.66. Состояния синхронной машины в оси d при переходном процессе

потока в обмотку возбуждения. Это положение определяет сверхпереходным сопротивлением x''_d (рис. 4.66, а). После того как поток проник в демпферную обмотку, изменению его препятствует обмотка возбуждения. Это состояние машины характеризуется переходным сопротивлением x'_d (рис. 4.66, б). В установившемся режиме машина имеет по продольной оси сопротивление x_d (рис. 4.66, в).

Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси x''_d и переходное сопротивление x'_d характеризуются соответствующими схемами замещения, показанными на рис. 4.67. Во всех схемах замещения сопротивления приведены к обмотке якоря. Сверхпереходное сопротивление x''_d определяется параллельным соединением индуктивного сопротивления $x_{2\sigma d}$, учитывающего влияние демпферной обмотки, и сопротивления $x_{\sigma f}$, учитывающего влияние обмотки возбуждения на переходный процесс.

При отсутствии демпферной обмотки переходное сопротивление x'_d определяется установившимся сопротивлением реакции якоря x_{ad} и сопротивлением $x_{\sigma f}$, учитывающим демпфирующие свойства обмотки возбуждения.

Сопротивления $x_{\sigma f}$ и $x_{2\sigma d}$ значительно меньше x_{ad} , поэтому $x''_d < x'_d < x_d$. В относительных единицах $x''_d = 0,1 \div 0,3$, $x'_d = 0,25 \div 0,4$.

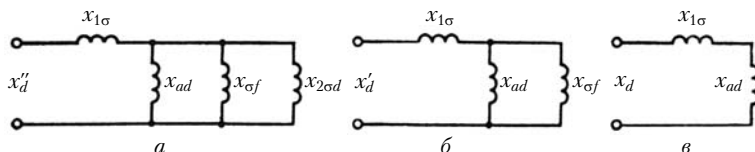


Рис. 4.67. Схемы замещения, характеризующие состояние машины в переходном процессе по оси d

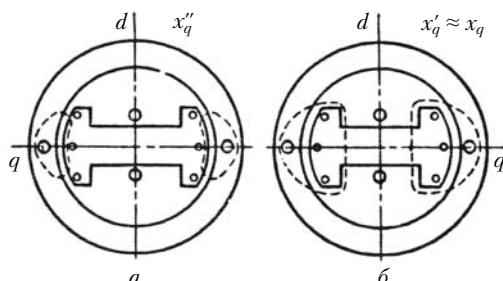


Рис. 4.68. Состояния синхронной машины по оси q при переходном процессе

По поперечной оси машины при активном токе в обмотке якоря в процессе изменения тока в обмотках при постоянстве потокосцепления процессы протекают подобно тому, как они протекают по продольной оси. В начальный момент машина с демпферной обмоткой характеризуется сверхпереходным индуктивным сопротивлением x''_q (рис. 4.68, а). Переходное индуктивное сопротивление по поперечной оси машины x'_q характеризует машину в переходном процессе без демпферной обмотки (рис. 4.68, б). Сопротивление $x_{2\sigma q}$ характеризует демпфирующее влияние демпферной обмотки по оси q .

Для сверхпереходного и переходного сопротивлений по поперечной оси, так же как и для соответствующих сопротивлений по продольной оси, могут быть предложены эквивалентные схемы замещения (рис. 4.69, а, б).

Хотя $x_d < x_q$, обычно $x''_d \leq x''_q$. Это объясняется тем, что по поперечной оси меньше демпфирующих контуров. Для турбогенераторов $x''_q = 0,12 \div 0,25$, а для гидрогенераторов $x''_q = 0,15 \div 0,35$.

Опытным путем параметры x''_d и x''_q могут быть найдены по данным следующих опытов: 1) внезапного трехфазного короткого замыкания; 2) опыта восстановления напряжения; 3) при пульсирующем поле обмотки статора и произ-

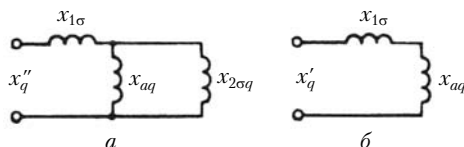


Рис. 4.69. Схемы замещения, характеризующие состояние машины в переходном процессе по оси q

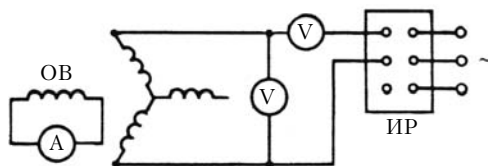


Рис. 4.70. Схема опытного определения x_d'' и x_q''

вольном положении ротора; 4) при пульсирующем поле обмотки статора и установке ротора в продольном и поперечном направлениях. В последнем опыте осуществляют медленное вращение ротора в пульсирующем поле статора при замкнутой амперметром обмотке возбуждения (рис. 4.70). При проведении опыта на машину подают пониженное напряжение и по максимальному и минимальному значениям токов находят сверхпереходные сопротивления:

$$x_d'' = \frac{U}{2I_{\max}}; \quad (4.115)$$

$$x_q'' = \frac{U}{2I_{\min}}. \quad (4.116)$$

При повороте ротора ось поля попеременно совпадает с продольной и поперечной осями машины и ток определяется сопротивлениями по продольной и поперечной осям машины. Близкие процессы имеют место и при коротком замыкании.

В машине без демпферной обмотки таким образом определяются x_d' и x_q' .

Определение опытным путем индуктивного сопротивления обратной последовательности и сверхпереходных параметров (см. параграф 4.18) отличается лишь тем, что при определении x_2 частота вращения номинальная, а при определении x_d'' и x_q'' — близка к нулю. Значения x_2 и x_d'' обычно близки друг другу.

При коротком замыкании в токах обмотки якоря есть периодические и апериодические составляющие (рис. 4.71). Периодические

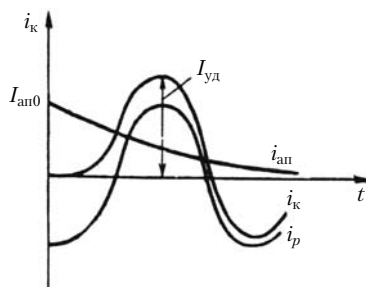


Рис. 4.71. Трехфазное короткое замыкание синхронного генератора

составляющие i_{π} создают вращающееся поле, неподвижное относительно ротора. Апериодические составляющие $i_{\text{ап}}$ создают неподвижное относительно обмоток статора магнитное поле, которое в обмотках ротора наводит переменные токи частоты сети. Начальное значение апериодических токов в фазах обмотки статора зависит от момента, когда произошло короткое замыкание. На рис. 4.71 показан момент короткого замыкания, когда апериодический ток максимален.

Наиболее опасно для синхронной машины ударное значение тока короткого замыкания, которое для машины с демпферной обмоткой может быть принято равным

$$I_{\text{уд}} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{\text{ном}}}{x_d''}, \quad (4.117)$$

а для машин без демпферной обмотки

$$I_{\text{уд}} = 1,8 \frac{\sqrt{2} \cdot 1,05 U_{\text{ном}}}{x_d'}. \quad (4.118)$$

Иногда вводят понятие кратности ударного тока

$$k_{\text{уд}} = \frac{I_{\text{уд}}}{\sqrt{2} I_{\text{ном}}}. \quad (4.119)$$

В уравнениях (4.117), (4.118) коэффициент 1,8 учитывает затухание апериодической составляющей и принимается на 5% завышенное значение номинального напряжения.

Наибольшему воздействию токов короткого замыкания подвергаются лобовые части обмоток статора, которые в турбогенераторах имеют большую длину. Для уменьшения деформаций лобовые части обмоток крупных синхронных машин имеют усиленное крепление. Электродинамические усилия в обмотках пропорциональны квадрату токов. Эти усилия стремятся отогнуть лобовые части обмотки к торцевым частям магнитопровода. Амплитуда токов короткого замыкания $I_{\text{уд}}$ для машин мощностью больше 2 МВт не должна быть больше 15.

На рис. 4.72, *a* — *в* представлено изменение токов в обмотках синхронной машины при коротком замыкании. Токи в фазах якоря имеют периодическую и апериодическую составляющие, затухающие каждая со своей постоянной времени. На рис. 4.72, *a* показано изменение тока фазы i_a , когда апериодическая составляющая отсутствует. Переходные

токи в обмотке возбуждения и демпферной обмотке изменяются по разным законам, зависящим от постоянных времени обмоток (рис. 4.72, б и в).

При анализе переходных процессов в синхронных машинах можно говорить о достаточно большом числе постоянных времени. Так, для обмотки якоря постоянная времени для среднего значения x_d'' и x_q''

$$T_a = \frac{x_d'' + x_q''}{2\omega r_a}, \quad (4.120)$$

при отсутствии демпферной обмотки

$$T_a = \frac{x_d' + x_q'}{2\omega r_a}. \quad (4.121)$$

Вычисляют также постоянные времени обмоток якоря при разомкнутых и замкнутых поочередно обмотках ротора.

Обмотки ротора имеют свои постоянные времени, а в явнополюсной машине рассматриваются еще и постоянные времени по продольной и поперечной осям машины. Наиболее важные постоянные времени машины указываются в каталогах.

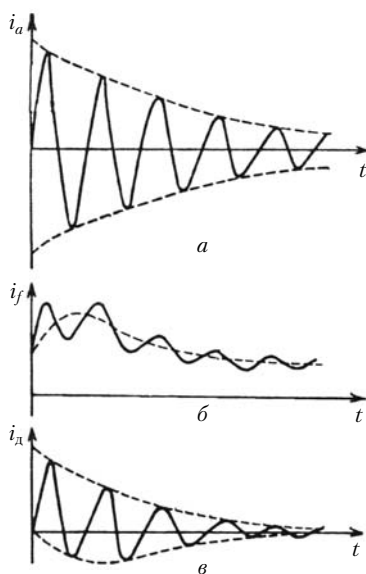


Рис. 4.72. Токи синхронного генератора при трехфазном коротком замыкании

Апериодические токи обмотки якоря наводят в обмотках ротора переменные токи, затухающие в обмотке возбуждения (см. рис. 4.72, б) и в демпферной обмотке (см. рис. 4.72, в), с разными постоянными времени. Демпферная обмотка сглаживает колебания токов в обмотке возбуждения, предохраняя возбудитель от перегрузок по току и перенапряжений. Затухание апериодических токов зависит в основном от активных сопротивлений контуров.

При коротком замыкании токи, протекающие в обмотках статора и ротора, создают ударные моменты, воздействующие на вал машины.

Знакопеременные моменты ускоряют и замедляют ротор (рис. 4.73).

При этом

$$M_k = M_{k0} e^{\frac{t}{T_m}} \sin \omega t, \quad (4.122)$$

где T_m — постоянная времени, определяющая затухание ударного момента, зависящая от постоянной времени обмотки возбуждения и обмотки якоря.

Так как момент пропорционален токам в статоре и роторе, то

$$\frac{M_{k0}}{M_{ном}} \approx 5 \div 15. \quad (4.123)$$

Такое увеличение момента в переходных процессах необходимо учитывать при расчете на прочность валов и муфт, соединяющих синхронные генераторы с турбинами. Ударный момент, так же как и электромагнитный момент в установившемся режиме, приложен и к ротору, и к статору, поэтому болты, крепящие машину к фундаменту, должны быть рассчитаны на эти усилия.

Механические воздействия при коротком замыкании более опасны для машины, чем тепловые, так как эти процессы кратковременные.

Переходные процессы в синхронной машине связаны не только с электромагнитными, но и электромеханическими процессами, сопровождающимися колебаниями частоты вращения. Исследование переходных процессов в синхронных машинах с учетом изменения частоты вращения возможно только с применением ЭВМ и рассматривается в спецкурсах [7,15].

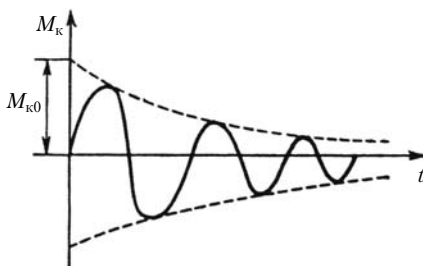


Рис. 4.73. Момент синхронной машины при коротком замыкании

4.20. Переходные процессы при гашении поля

При коротких замыканиях внутри генератора или на его выводах генератор отключается от сети. Но токи короткого замыкания при повреждениях внутри машины или до выключателя остаются, и для их устранения необходимо быстро снизить ток возбуждения до нуля. Этот процесс называется гашением магнитного поля.

При гашении поля необходимо изменять ток в обмотке возбуждения по определенному закону. Разрыв цепи возбуждения недопустим из-за перенапряжений, а также из-за того, что запасенная в магнитном поле энергия вызовет на контактах выключателя электрическую дугу, гашение которой потребует мощного дугогасительного устройства. Медленное снижение тока в обмотке возбуждения недопустимо, так как длительное протекание аварийного тока приведет к тяжелым повреждениям машины. Поэтому необходимо изменять ток в обмотке возбуждения так, чтобы перенапряжения были допустимы, а время отключения — минимальным.

На рис. 4.74 показана принципиальная схема возбуждения синхронных генераторов с автоматом гашения поля. При коротком замыкании замыкается контакт K_2 и отключается контакт K_1 . Обмотка возбуждения синхронного генератора ОВГ замыкается на резистор R_2 , сопротивление которого в 3–5 раз больше сопротивления обмотки возбуждения синхронного генератора. При отключении обмотки ОВГ в переходном процессе участвуют все контуры, в которых могут протекать токи. При разомкнутых обмотках якоря и демпферной обмотки время переходного процесса будет определяться постоянной времени обмотки возбуждения генератора

$$T_{d0} = \frac{L_f}{r_f}, \quad (4.124)$$

где L_f , r_f — индуктивность и активное сопротивление обмотки возбуждения.

Чем больше активное сопротивление в контуре ОВГ, тем меньше T_{d0} и тем быстрее затухает ток в обмотке возбуждения. Время T_{d0} для синхронных машин равно 2÷14 с, у турбогенераторов оно больше, чем у гидрогенераторов.

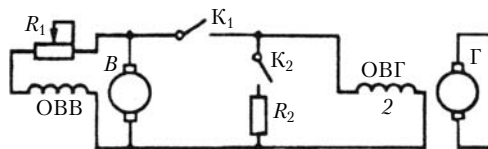


Рис. 4.74. Схема возбуждения с автоматом гашения поля:

В — возбудитель; Г — синхронный генератор; ОВГ — обмотка возбуждения генератора; ОВВ — обмотка возбуждения возбудителя; R_1 — регулировочный резистор; K_1 , K_2 — контакты автомата гашения поля; R_2 — резистор автомата гашения поля

При наличии демпферной обмотки и разомкнутой обмотки якоря необходимо время переходного процесса определять из решения двух уравнений, соответствующих условной схеме рис. 4.75:

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_f + pL_f & pM \\ pM & r_d + pL_d \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_f \\ i_d \end{vmatrix}, \quad (4.125)$$

где i_f и i_d — токи в обмотке возбуждения и демпферной обмотке; L_d , r_d — индуктивность и активное сопротивление демпферной обмотки; M — взаимная индуктивность между обмотками.

Затухание тока в обмотке возбуждения с учетом демпферной обмотки определяется постоянной времени T'_{d0} .

При учете замкнутой обмотки якоря и демпферной обмотки уравнения имеют вид:

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_f + pL_f & pM & pM \\ pM & r_d + pL_d & pM \\ pM & pM & r_a + pL_a \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_f \\ i_d \\ i_a \end{vmatrix}, \quad (4.126)$$

где L_a , r_a — индуктивность и активное сопротивление обмотки якоря; p — оператор дифференцирования.

При записи уравнений (4.126) считаем, что взаимная индуктивность M между обмотками одинаковая, а $L_f = M + L_{\sigma f}$, $L_d = M + L_{\sigma d}$, и $L_a = M + L_{\sigma a}$, где $L_{\sigma f}$, $L_{\sigma d}$, $L_{\sigma a}$ — индуктивности рассеяния обмоток возбуждения, демпферной и якоря.

Затухание тока возбуждения при учете двух контуров (обмоток якоря и демпферной) определяется постоянной времени T''_{d0} ; $T'_{d0} \gg T''_{d0}$, для турбогенераторов $T''_{d0} = 0,1 \div 0,2$ с, а $T'_{d0} = 7 \div 12$ с; для гидрогенераторов $T''_{d0} = 0,05 \div 0,1$ с, а $T'_{d0} = 3 \div 7$ с.

Ток возбуждения быстрее затухает в гидрогенераторах. Включение в контур обмотки возбуждения активного сопротивления снижает время переходного процесса. При замкнутой обмотке якоря токи в обмотке возбуждения и демпферной обмотке в начале переходного процесса затухают быстрее.

На рис. 4.76 показано затухание токов в обмотке возбуждения и изменение тока в демпферной обмотке при гашении поля.

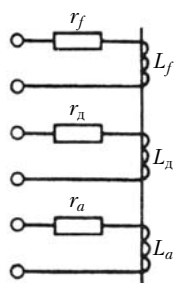


Рис. 4.75. Схема для определения постоянных времени обмотки возбуждения

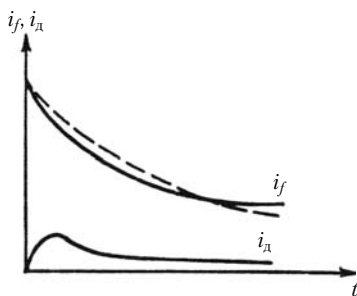


Рис. 4.76. Токи в обмотке возбуждения и демпферной обмотке при гашении поля

При исследовании переходных процессов в синхронных машинах необходимо учитывать токи, протекающие в бочке ротора турбогенератора, а также токи в стали статора. Тогда число уравнений напряжения возрастает до пяти, что снова усложнит их решение.

При решении уравнений (4.126) в токах статора и ротора можно выделить аperiodические и периодические составляющие, которые затухают со своими постоянными времени. В настоящее время уравнения (4.126) решают на ЭВМ вместе с уравнением движения с учетом изменения частоты вращения и нелинейностей.

При аварийных отключениях генератора от сети нельзя быстро снять момент с паровой или гидравлической турбины. Поэтому ротор генератора разгоняется, и если снова не подключить генератор к сети, частота вращения ротора генератора увеличится и синхронный генератор начнет работать в асинхронном режиме. Работа синхронного генератора в асинхронном режиме допускается кратковременно при небольших скольжениях. В асинхронном режиме генератор работает с отключенной обмоткой возбуждения. При включенной обмотке возбуждения в асинхронном режиме возникают знакопеременные моменты, которые раскачивают ротор, усугубляя отрицательные последствия — увеличивается амплитуда токов, растут ударные моменты.

При аварийных отключениях генератора от сети нельзя быстро снять момент с паровой или гидравлической турбины. Поэтому ротор генератора разгоняется, и если снова не подключить генератор к сети, частота вращения ротора генератора увеличится и синхронный генератор начнет работать в асинхронном режиме. Работа синхронного генератора в асинхронном режиме допускается кратковременно при небольших скольжениях. В асинхронном режиме генератор работает с отключенной обмоткой возбуждения. При включенной обмотке возбуждения в асинхронном режиме возникают знакопеременные моменты, которые раскачивают ротор, усугубляя отрицательные последствия — увеличивается амплитуда токов, растут ударные моменты.

В асинхронном режиме при отключенной обмотке возбуждения синхронная машина работает как асинхронная. В контурах ротора протекают токи скольжения, реактивная мощность поступает из сети. В асинхронном режиме в роторе появляются потери скольжения, которые в крупных генераторах даже при скольжении в несколько сотых процентов при длительной работе недопустимы.

Процесс ресинхронизации — выхода машины из синхронного режима сопровождается сложными переходными процессами и осуществляется автоматами гашения поля (АГП) и повторного включения (АПВ).

При возникновении аварийной ситуации вне машины осуществляется трижды повторное подключение генерато-

ра к сети. Если короткое замыкание ликвидировано (выгорел закороченный участок) или устранена аварийная ситуация, машина должна как можно быстрее подключаться к сети для поддержания в системе номинального напряжения и частоты. Переходные процессы при повторном включении сопровождаются бросками токов и моментов и оказывают значительное влияние на надежную работу машины. Достоверное определение ударных моментов дает возможность правильно рассчитывать валопроводы, муфты, деформации лобовых частей обмоток и крепление к фундаменту крупных синхронных машин.

Исследование сложных переходных процессов необходимо для обеспечения надежной работы синхронных машин и энергетических систем.

4.21. Качания синхронных машин. Динамическая устойчивость

В установившемся режиме вращения синхронной машины внешний механический момент и электромагнитный момент, развиваемый синхронной машиной, взаимно уравновешены и ротор вращается с постоянной угловой скоростью

$$M_{\text{вн}} + M_{\text{эм}} = 0 \quad (4.127)$$

(здесь моменты должны быть взяты со своими знаками).

Угол нагрузки θ в этом случае будет неизменен, как неизменным будет и положение ротора по отношению к результирующему магнитному полю. Внешний механический и электромагнитный моменты в уравнении (4.127) не являются неизменными во времени. Если, например, рассмотреть работу синхронной машины в режиме генератора, внешний вращающий механический момент может быть непостоянным по своей природе или испытывать изменения из-за непостоянства параметров (плотности, температуры) охлаждающего агента, поступающего в турбину (паровую, гидравлическую или газовую). Электромагнитный момент может изменяться при изменениях напряжения и частоты сети, тока возбуждения. Неуравновешенность движущих моментов и моментов сопротивления приводит к появлению ускорения ротора $\frac{d\omega_p}{dt}$ с положительным или отрицательным знаком и изменению угла θ на угол θ'

$$\sum M = J \frac{d\omega_p}{dt} = J \frac{d^2\theta'}{p dt^2}, \quad (4.128)$$

где J — момент инерции ротора; p — число пар полюсов.

В выражении (4.128) под знаком суммы присутствуют все моменты, действующие на ротор генератора при изменении угла θ . Направление вращения задается внешним механическим моментом $M_{\text{вн}} + \Delta M_{\text{вн}}$. Электромагнитный момент, препятствующий вращению, при изменении угла θ на угол θ' , например, для неявнополюсного генератора с учетом знака по уравнениям (4.75) и (4.78) равен

$$M_{\text{вн}} + \Delta M_{\text{вн}} = -\frac{mUE_0}{\omega_c x_c} \sin \theta - \frac{mUE_0}{\omega_c x_c} (\cos \theta) \cdot \theta' = -M_{\text{эм}} - m_c \theta', \quad (4.129)$$

где $m_c = \frac{mUE_0}{\omega_c x_c} \cos \theta$ — удельный синхронизирующий момент.

При изменении угла θ появится асинхронный момент M_D , который при малых θ' может быть принят пропорциональным скольжению $s = -\frac{p}{\omega_c} \frac{d\theta'}{dt}$:

$$M_D = \frac{pmU^2}{\omega_c r_2'} s = \frac{pmU^2}{\omega_c r_2'} \left[-\frac{d\theta'}{p\omega_c dt} \right] = -\frac{mU^2}{\omega_c^2 r_2'} \frac{d\theta'}{dt} = -D \frac{d\theta'}{dt}. \quad (4.130)$$

Сомножитель D в выражении (4.130) часто называют коэффициентом демпфирования, он пропорционален квадрату напряжения сети и обратно пропорционален приведенному сопротивлению роторных контуров, в которых возникают индуктированные при несинхронном вращении ротора токи.

С учетом уравнения (4.127) уравнение (4.128) можно представить в виде

$$-\Delta M_{\text{вн}} - m_c \theta' - D \frac{d\theta'}{dt} = J \frac{d^2\theta'}{p dt^2}.$$

Таким образом, несинхронное движение ротора (изменение угла θ на угол θ' под влиянием дополнительного внешнего момента $\Delta M_{\text{вн}}$) описывается дифференциальным неоднородным уравнением второго порядка

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\theta'}{p dt^2} + D \frac{d\theta'}{dt} + m_c \theta' = \Delta M_{\text{вн}}. \quad (4.131)$$

Уравнение движения синхронной машины, работающей параллельно с сетью (4.131), аналогично уравнению колебательного контура (рис. 4.77):

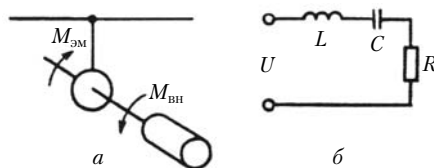


Рис. 4.77. Синхронная машина, работающая параллельно с сетью (а), и колебательный контур (б)

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{du}{dt}. \quad (4.132)$$

Уравнения (4.131) и (4.132) подобны и их можно анализировать, применяя метод аналогии, заключающийся в том, что подобным уравнениям, описывающим разные процессы, соответствуют одни и те же решения. В уравнениях (4.131) и (4.132)

$$L \rightleftharpoons \frac{J}{p}; \quad D \rightleftharpoons R; \quad m_c \rightleftharpoons \frac{1}{C}; \quad i \rightleftharpoons \theta'; \quad \Delta M_{вн} \rightleftharpoons -\frac{du}{dt}.$$

Период собственных колебаний для уравнения (4.132):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (4.133)$$

По аналогии для уравнения (4.131):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{m_c p}{J} - \frac{D^2 p^2}{4J^2}}. \quad (4.134)$$

Так как $4J^2 \gg D^2$, можно считать ω_0 для синхронной машины, работающей параллельно с сетью, равной

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{m_c p}{J}}. \quad (4.135)$$

Период собственных колебаний синхронной машины, работающей параллельно с сетью, невелик и равен 1–2 Гц.

При параллельной работе синхронной машины с сетью так же, как и в колебательном контуре, появляются качания. Необходимо синхронную машину рассчитывать таким образом, чтобы машина не могла войти в резонанс с сетью. Для этого необходимо, чтобы частота собственных колебаний машины и частота сети значительно отличались друг от друга.

Частота собственных колебаний машины зависит от параметров машины и во многом определяется J . Чем больше J ,

тем меньше ω_0 . Демпферная обмотка уменьшает амплитуду качаний. Особенно склонны к качанию синхронные машины мощностью 10—100 кВт, когда сочетание параметров на более неблагоприятно.

При работе синхронного двигателя на ударную нагрузку или в случае, когда синхронный генератор вращается поршневым двигателем, могут возникнуть вынужденные колебания ротора.

При совпадении частоты колебаний момента с частотой собственных колебаний ω_0 наступает резонанс, когда машина раскачивается и выпадает из синхронизма. Качания ротора сопровождаются колебаниями токов в якоре машины, что вызывает вибрации, шум и возрастание потерь. При ударной нагрузке необходимо выполнять демпферную обмотку с меньшим сопротивлением и выбирать момент инерции так, чтобы частота ω_0 и частота вынужденных колебаний значительно отличались друг от друга. При аварийном сбросе нагрузки синхронный генератор может при увеличении частоты вращения работать кратковременно в режиме асинхронного генератора, а при перегрузках синхронная машина выпадает из синхронизма и переходит в режим работы асинхронным двигателем. В этих режимах нарушается статическая устойчивость синхронной машины, работающей параллельно с сетью, поэтому эти режимы допускаются кратковременно.

Динамическая устойчивость — это способность синхронной машины оставаться в синхронизме при резких изменениях нагрузки и параметров сети. В отличие от понятия статической устойчивости, когда процессы преобразования энергии происходят в установившемся режиме, динамическая устойчивость — способность машины оставаться в синхронизме в переходных режимах.

Исследование динамической устойчивости возможно при решении уравнений (4.1)—(4.8) на ЭВМ. При этом система уравнений синхронной машины, работающей параллельно с сетью, усложняется тем, что при толчкообразном изменении нагрузки изменяется также напряжение сети и за счет работы регулятора возбуждения — ток возбуждения.

Предположим, что синхронный генератор до понижения напряжения в сети устойчиво работал в точке *a* угловой характеристики 1 (рис. 4.78). Угол $\theta = \theta_1$. После снижения напряжения ввиду инерционности ротора угол θ скачком измениться не может, поэтому мощность, отдаваемая генерато-

ром в сеть, уменьшится до значения, определяемого точкой b . Электромагнитный момент $M_{эм}$, препятствующий вращению генератора в соответствии с формулой (4.127) станет меньше внешнего механического момента $M_{вн}$. Избыточный момент начнет разгонять ротор, и угол θ будет возрастать по угловой характеристике 2. Избыток момента, ускоряющего ротор,

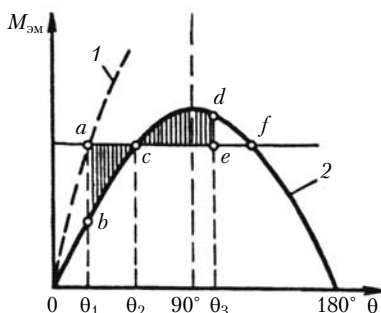


Рис. 4.78. К определению динамической устойчивости

будет иметь место до точки c , в которой вращающий и противодействующий моменты будут равны. Но накопленная ротором в точке c избыточная кинетическая энергия будет продолжать увеличивать угол θ . Можно показать, что эта накопленная энергия пропорциональна площади S_{abc} криволинейного треугольника abc , заштрихованного на рис. 4.78. Правее точки c ротор начинает тормозиться, так как выше точки c электромагнитный тормозящий момент начинает преобладать над вращающим генератором моментом. При торможении запасенная кинетическая энергия будет израсходована и ротор достигнет точки d при угле $\theta = \theta_3$. Положение точки d определится из равенства площадей криволинейных треугольников ускорения и замедления abc и cde : $S_{abc} = S_{cde}$ (по этой причине изложенный метод иногда носит название метода площадей). Предельная энергия при торможении будет пропорциональна площади фигуры $cdfe$.

Метод площадей дает возможность ответить на вопрос, останется ли машина в синхронизме. Если площадь ускорения, характеризуемая криволинейным треугольником abc , меньше площади замедления $cdfe$, то машина удержится в синхронизме. Если площадь торможения будет меньше площади ускорения, машина выпадает из синхронизма — наступит динамическая неустойчивость.

Чем больше нагружена машина, т.е. чем больше угол θ , тем меньше площадь замедления и тем меньше вероятность того, что машина удержится в синхронизме. Запас динамической устойчивости больше у машины, работающей с небольшой нагрузкой. Наброс нагрузки обычно сопровождается уменьшением напряжения, т.е. уменьшением максимального электромагнитного момента. Чтобы сохранить потоко-

сцепление, форсируют возбуждение. Форсировка возбуждения улучшает динамическую устойчивость. Однако обмотка возбуждения должна иметь небольшую постоянную времени, а возбудитель должен допускать 2–2,5-кратные форсировки. Быстрому успокоению колебаний ротора машины способствуют демпферная обмотка и автоматическое регулирование возбуждения.

4.22. Системы возбуждения синхронных машин

Система возбуждения синхронной машины состоит из возбудителя и системы регулирования тока возбуждения, замыкающегося в обмотке возбуждения синхронной машины и в обмотках возбудителя. Система возбуждения должна обеспечивать надежную работу синхронной машины, выполняя регулирование тока возбуждения, форсировку возбуждения, гашение поля возбуждения. Эти процессы в крупных машинах осуществляются автоматически. Системы возбуждения делятся на два типа — *прямые* и *косвенные*.

В прямых системах возбуждения якорь возбудителя жестко соединен с валом синхронной машины. В косвенных системах возбуждения возбудитель приводится во вращение двигателем, который питается от шин собственных нужд электростанции или вспомогательного генератора. Последний может быть соединен с валом синхронной машины или работать автономно. Прямые системы более надежны, так как при аварийных ситуациях в энергосистеме ротор возбудителя продолжает вращаться вместе с ротором синхронной машины и обмотка возбуждения не обесточивается.

На рис. 4.79, *a* — *в* приведены наиболее распространенные схемы возбуждения синхронных машин.

На рис. 4.79, *a* представлена наиболее распространенная прямая схема с электромашинными возбудителями. К обмотке возбуждения ОВГ синхронного генератора СГ постоянный ток через контактные кольца подается с якоря возбудителя В. Обмотка возбуждения возбудителя ОВВ питается от якоря подвозбудителя ПДВ. Управление током в обмотке возбуждения синхронного генератора осуществляется резистором R_p , включенным в цепь обмотки возбуждения подвозбудителя ОВПДВ.

Подвозбудитель и возбудитель — генераторы постоянного тока. Их якоря муфтами соединены с ротором синхронного генератора. Мощность обмотки возбуждения ге-

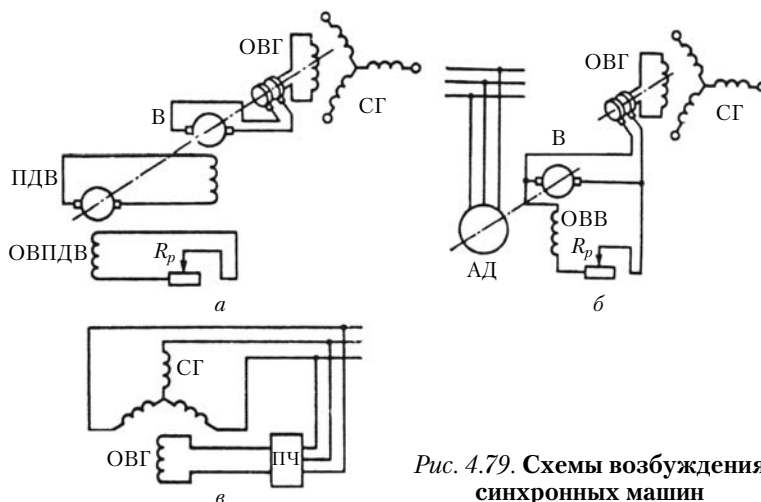


Рис. 4.79. Схемы возбуждения синхронных машин

нераторов постоянного тока составляет 0,2–5% мощности генератора. Поэтому мощность управления в каскадной схеме из двух генераторов постоянного тока (см. рис. 4.79, а) составляет несколько процентов мощности возбуждения синхронного генератора. Коэффициент усиления схемы равен произведению коэффициентов усиления по мощности двух генераторов постоянного тока (10^2 – 10^3).

Предельная мощность генератора постоянного тока с частотой вращения 3000 об/мин примерно 600 кВт. Поэтому генераторы постоянного тока в качестве возбудителей могут применяться в турбогенераторах мощностью 100–150 МВт. Генераторы постоянного тока в качестве возбудителей находят широкое применение в синхронных двигателях и синхронных генераторах автономных энергетических систем.

На рис. 4.79, б дана схема косвенного возбуждения с возбудителем — генератором постоянного тока с независимым возбуждением. Якорь генератора постоянного тока вращается асинхронным АД или синхронным двигателем, которые подсоединяются к сети переменного тока, не зависящей от напряжения синхронного генератора.

Наибольшее распространение получили схемы возбуждения со статическими преобразователями переменного тока в постоянный. В 1950-х гг. для возбуждения гидрогенераторов применялась схема возбуждения с ртутными выпрямителями, а в последнее время широкое применение находят

тиристорные схемы возбуждения, которые могут быть контактными и бесконтактными. В контактных схемах через кольца ток возбуждения от тиристорного преобразователя подается на обмотку возбуждения. При этом переменный ток на тиристорный преобразователь подается или от электромашинного возбудителя, или от сети.

В крупных турбогенераторах в качестве электромашинного источника электрической энергии используется индукторный высокочастотный генератор (рис. 4.80). Ротор индукторного генератора жестко связан с ротором турбогенератора. На роторе индукторного генератора нет обмоток, а обмотки якоря расположены на статоре. Принцип действия индукторного генератора рассматривается в параграфе 4.23.

В бесщеточных системах возбуждения обмотка якоря и выпрямители находятся на роторе. Возбудитель выполняется многофазным для турбогенератора мощностью 1000 МВт, 1500 об/мин. Возбудитель имеет длину 3 м. Мощность возбудителя в кратковременном режиме 7,2 МВт и при длительной работе 2,8 МВт. Максимальный ток 9,6 кА при напряжении 0,75 кВ. В турбогенераторе мощностью 500 МВт мощность возбудителя 2,4 МВт.

Ко всем системам возбуждения предъявляются жесткие требования, регламентированные ГОСТ 21558—2000. Сис-

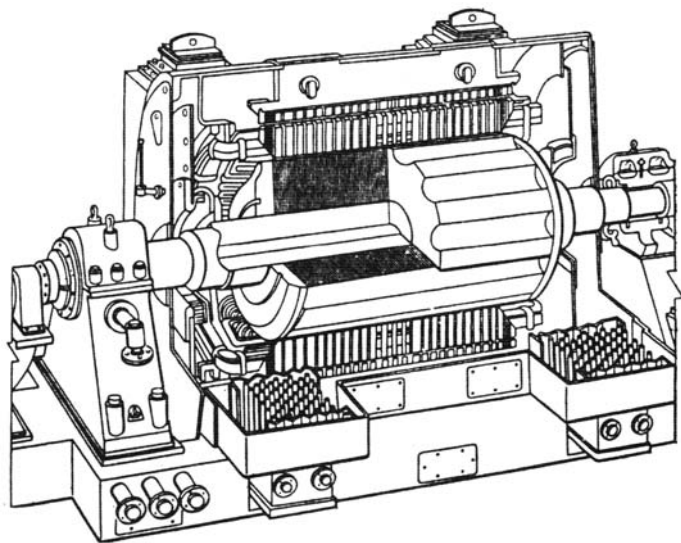


Рис. 4.80. Индукторный возбудитель турбогенераторов

мы возбуждения должны обеспечивать форсировку возбуждения при снижении напряжения сети и аварийных режимах. Согласно указанному ГОСТу кратность предельного установившегося напряжения возбудителя (отношение максимального напряжения возбудителя к номинальному напряжению возбудителя) для крупных генераторов и синхронных компенсаторов равна 1,8–2, для других синхронных машин — 1,4–1,6.

Системы возбуждения должны быть быстродействующими. Номинальная скорость нарастания напряжения возбудителя, т.е. изменение напряжения от номинального до максимального, должна быть 1–1,5 с для крупных машин, а для остальных 0,8–1 с.

Регулирование тока возбуждения, как правило, осуществляется путем изменения напряжения возбудителя. Так как возбудитель не насыщен, ток возбуждения изменяется пропорционально напряжению. Только в синхронных машинах небольшой мощности регулирование тока возбуждения осуществляется реостатами.

Гашение поля при аварийных режимах обеспечивается АГП за 0,8–1,5 с. Обычно сопротивление, на котором происходит гашение поля, в 5 раз превышает сопротивление контура возбуждения, а напряжение на нем в переходном процессе не превышает более чем в 5 раз напряжение возбуждения.

Наряду с системами возбуждения, рассмотренными выше, применяются системы возбуждения от высших гармоник и обратной последовательности.

В воздушном зазоре электрической машины существует бесконечный спектр гармоник поля, которые вращаются со скоростью, отличающейся от основной гармоники, или вращаются в противоположном направлении по отношению к основной гармонике. Высшие гармоники поля наводят в обмотках ротора напряжения, зависящие от скольжения и амплитуды гармоники. Если замкнуть обмотки ротора выпрямителями, в них будет протекать пульсирующий ток высших гармоник, который создаст постоянный поток возбуждения (рис. 4.81).

Обычно для возбуждения используется 3-я гармоника поля и выполняется специальная обмотка на роторе с числом полюсов, в 3 раза большим по отношению к основной гармонике. С возбуждением от 3-й гармоники выпускается серия синхронных генераторов ЕС мощностью до 100 кВт.

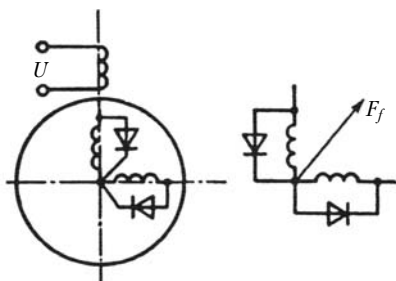


Рис. 4.81. Система возбуждения от обратной последовательности и высших гармоник

Представляет интерес использование для возбуждения обратного поля. В однофазных двигателях при возбуждении от обратной последовательности (см. рис. 4.81) могут быть получены массогабаритные и энергетические характеристики, близкие к характеристикам трехфазных асинхронных двигателей.

Системы возбуждения синхронных машин весьма разнообразны и во многом определяют конструкцию синхронной машины. Некоторые видоизменения систем возбуждения будут рассмотрены при изучении специальных синхронных машин.

4.23. Специальные синхронные машины

Синхронные машины со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Предельная мощность турбогенераторов с внутренним водяным охлаждением обмоток статора и ротора ограничивается 2 млн кВт. Дальнейший рост единичной мощности турбогенераторов возможен при применении сверхпроводящих обмоток возбуждения. Применение сверхпроводящих обмоток возбуждения в генераторах уже освоенных мощностей обеспечивает повышение КПД и снижение массы.

На рис. 4.82 дан поперечный разрез турбогенератора КТГ-1.5 мощностью 1500 кВт, 3000 об/мин. Ротор машины 1 представляет собой вращающийся криостат с вакуумной изоляцией. Жидкий гелий через узел подачи поступает на периферию бандажа ротора 2, удерживающего катушки возбуждения 3, и проходит через каналы в элементах крепления обмотки ротора. Пары гелия в центральной части делятся на два потока, охлаждающие концевые зоны ротора, экран 4 и токовводы. Газообразный гелий выходит из ротора при температуре, близкой к температуре окружающей среды. Ротор вращается в вакуумированном пространстве внутри оболочки из стеклопластика 5. Вакуум обеспечивается путем применения уплотнений. Сверхпроводящая обмотка

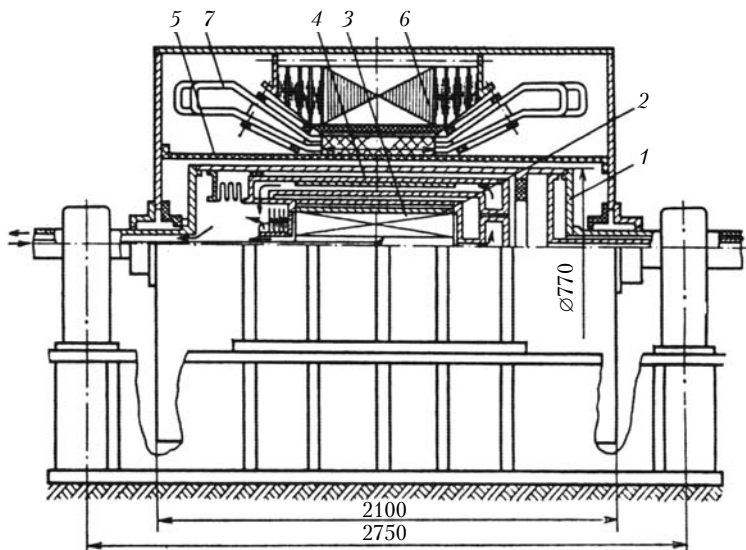


Рис. 4.82. Криогенный турбогенератор 1500 кВт, 3000 об/мин

ротора выполнена из ниобий-титановой шинки $3,5 \times 2$ мм в медной матрице. Плотность тока в обмотке возбуждения может достигать 100 А/мм^2 . Статор машины 6 шихтованный из электротехнической стали. Обмотка статора 7 выполнена из медных проводников, охлаждаемых водой.

В электрических машинах со сверхпроводящими обмотками возбуждения индукция в зазоре может достигать 1,3—1,5 Тл, поэтому сердечник статора нецелесообразно выполнять с зубцами. Статор в криогенных электрических машинах делают беззубцовым с шихтованным ферромагнитным экраном, который концентрирует магнитное поле внутри машины. Момент в беспазовых машинах приложен к обмотке, что вызывает необходимость в более тщательном ее креплении. Крепление обмотки статора в пазовой части осуществляется с помощью системы клиньев. Лобовая часть обмотки крепится к бандажным кольцам из стеклопластика, которые устанавливаются на кронштейнах.

Синхронная машина со сверхпроводящими обмотками возбуждения может работать в генераторном и двигательном режимах. Применение криогенных двигателей обеспечивает снижение габаритов и повышение их энергетических показателей. Однако дефицит и стоимость гелия и сверх-

проводящих материалов ограничивает применение криогенных машин.

Машины с постоянными магнитами. Одним из преимуществ машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения является то, что в них электрические потери в обмотке возбуждения равны нулю. Этим преимуществом обладают и машины с постоянными магнитами, которые называются еще магнитоэлектрическими машинами. Наибольшее распространение получили микродвигатели с постоянными магнитами. В самолетах, тракторах и автомобилях применяются генераторы с постоянными магнитами [9].

Статор 1 двигателей с постоянными магнитами (рис. 4.83) ничем не отличается от статора машин общего назначения. На роторе расположены постоянные магниты 3 и пусковая короткозамкнутая обмотка 2. Постоянные магниты на втулке 4 напрессовываются на вал 5.

Выполнение ротора с постоянными магнитами может быть весьма разнообразным: в виде звездочки, цилиндра, намагниченного в радиальном или аксиальном направлении, и др. В последнее время в качестве движущейся части машины стали применять ферромагнитную резину, когда постоянные магниты вкраплены в резину, которая может иметь различную форму.

Постоянные магниты могут располагаться не только на роторе, но и на статоре машины. Одна из конструкций синхронного двигателя с расположением постоянных магнитов на статоре 1 с ограниченным перемещением ротора 2, которая используется в моментных двигателях, показана на рис. 4.84.

Магнитоэлектрические машины по сравнению с машинами электромагнитного возбуждения имеют ряд преимуществ

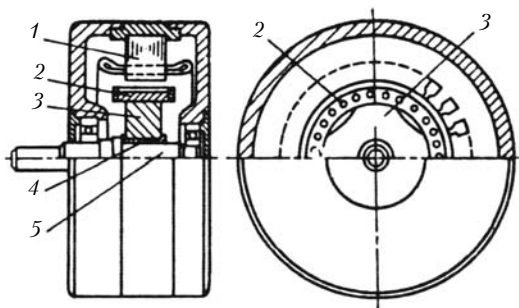


Рис. 4.83. Двигатель с постоянными магнитами

ществ: высокую надежность из-за отсутствия вращающихся обмоток, высокий КПД и меньшие нагревы из-за отсутствия потерь на возбуждение и в скользящем контакте, меньшие помехи радиоприему из-за отсутствия контактов.

Однако эти машины обладают и рядом недостатков: генераторы не допускают обычного способа регулирования напряжения (путем изменения тока возбуждения), они уже при мощности 300—400 Вт при имеющихся на сегодня серийных постоянных магнитах имеют повышенные стоимости, массу и габариты; двигатели с постоянными магнитами имеют плохие пусковые свойства.

Основным недостатком машин с постоянными магнитами является трудность регулирования потока возбуждения. Для регулирования потока возбуждения применяют обычное электромагнитное возбуждение, а также подмагничивание спинки статора.

Конструкция машин с постоянными магнитами определяется магнитными и технологическими свойствами постоянного магнита.

Постоянные магниты характеризуются петлей гистерезиса (рис. 4.85, а). Для оценки качества постоянных магнитов основное значение имеет часть петли во втором квадранте, которая называется кривой размагничивания. Предельная кривая размагничивания $B_r(H_c)$ соответствует максимально возможному намагничиванию магнита.

Постоянный магнит характеризуется индукцией насыщения B_s , соответствующей ей напряженностью H_s , остаточной индукцией B , и коэрцитивной силой H_c , а также коэффициентом возврата ρ и максимумом удельной магнитной энергии A_{\max} .

Коэффициент возврата

$$\rho = \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

Максимум удельной магнитной энергии, Дж/м³ (рис. 4.85, б):

$$A_{\max} = \frac{BH_{\max}}{2}$$

и соответствует индукции B_δ и напряженности H_δ .

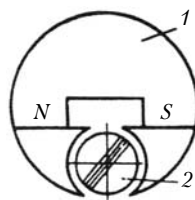


Рис. 4.84. Моментный двигатель

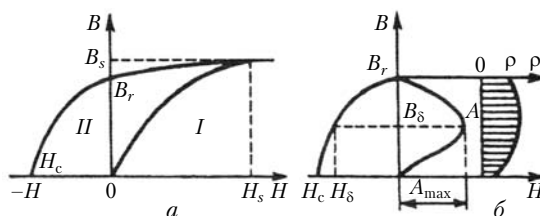


Рис. 4.85. Основные характеристики постоянных магнитов

В электромашиностроении применяются сотни марок сталей и сплавов постоянных магнитов, имеющих остаточную индукцию $B_r = 0,2 \div 1,5$ Тл и коэрцитивную силу $H_c = 4000 \div 400\,000$ А/м. Свойства постоянных магнитов улучшаются при легировании сплавов микродозами редкоземельных элементов. Самарий-кобальтовые постоянные магниты имеют $H_c = 8000$ А/см, $B_r \approx 0,8$ Тл и удельную энергию $(BH)_{\max} = (160 \div 240) \cdot 10^3$ Тл·А/м. Применение постоянных магнитов с высокой удельной энергией дает возможность создать высокоиспользуемые электрические машины.

Машины с клювообразным ротором. Как уже подчеркивалось, преобразование энергии в электрических машинах происходит в воздушном зазоре — пространстве, где концентрируется энергия магнитного поля. При этом форма магнитного поля определяет в основном энергетические показатели машины. Наилучшие характеристики в машине можно получить при круговом поле.

При сосредоточенной катушечной обмотке синусоидальное распределение индукции в зазоре можно получить за счет определенного профиля воздушного зазора — его магнитной проводимости. В машинах с клювообразным ротором распределение магнитного поля в воздушном зазоре, близкое к синусоидальному, достигается за счет профиля полюсного наконечника.

Стремление упростить конструкцию и технологию изготовления синхронных машин небольшой мощности массового производства привело к созданию машин с клювообразным (когтеобразным) ротором.

Клювообразные полюсные наконечники позволяют при одной катушке возбуждения, расположенной по оси машины, превратить аксиальное направление магнитного потока возбуждения в воздушном зазоре в радиально направленные потоки отдельных полюсов и получить многополюсную конструкцию синхронного генератора при относитель-

но небольшом диаметре ротора. Такая конструкция дает значительную экономию меди обмотки возбуждения.

Ротор с клювообразными (когтеобразными) полюсами широко применяется в генераторах, устанавливаемых на автомобилях и тракторах.

Генератор на автомобиле работает параллельно с аккумуляторной батареей, которую он должен подзаряжать, поэтому на выходе такой генератор должен иметь постоянное напряжение. Автотракторный генератор — это вентильный генератор, в котором встроен выпрямительный блок на кремниевых диодах. Обычно применяется трехфазная двухполупериодная схема выпрямления. Выпрямительный блок установлен так, что он интенсивно охлаждается потоком воздуха, охлаждающего генератор.

Другой особенностью автотракторных генераторов, позволившей достигнуть высокой технологичности генератора, является применение статора с малым числом пазов на полюс и фазу ($q = \frac{z_1}{2pt} \leq 1$).

Обмотки статора выполняются одно- или двухслойными. При $q = 1$ катушка располагается на трех зубцах и в пазу лежит одна сторона катушки, при $q < 1$ — на каждом зубце и в пазу лежат две стороны катушки.

До последнего времени генераторы были трехфазными с соединением фаз в звезду. С увеличением мощности стали переходить на соединение в треугольник и применять на статоре схемы двойная звезда и двойной треугольник. Появились автотракторные генераторы на пять и больше фаз.

На рис. 4.86 представлена конструкция автомобильного генератора Г-250 с клювообразным ротором. Два клювообразных полюсных наконечника 1 образуют 12-полюсную магнитную систему. Полюсные наконечники изготавливаются методом холодной штамповки. Обмотка возбуждения 2 помещается на втулке 3. Статор 4 шихтованный с 18 пазами. Обмотка статора 5 трехфазная однослойная с $q = 0,5$. Корпус 6 (подшипниковые щиты) выполнен из алюминиевого сплава. Трехфазное переменное напряжение преобразуется в постоянное выпрямителем 7, собранным по схеме трехфазного двухполупериодного выпрямителя. Постоянный ток на ротор подается с помощью двух колец 8 и двух щеток 9.

Индукторные синхронные машины. При рассмотрении уравнений электромеханического преобразования энергии было отмечено, что под знаком производной находятся как

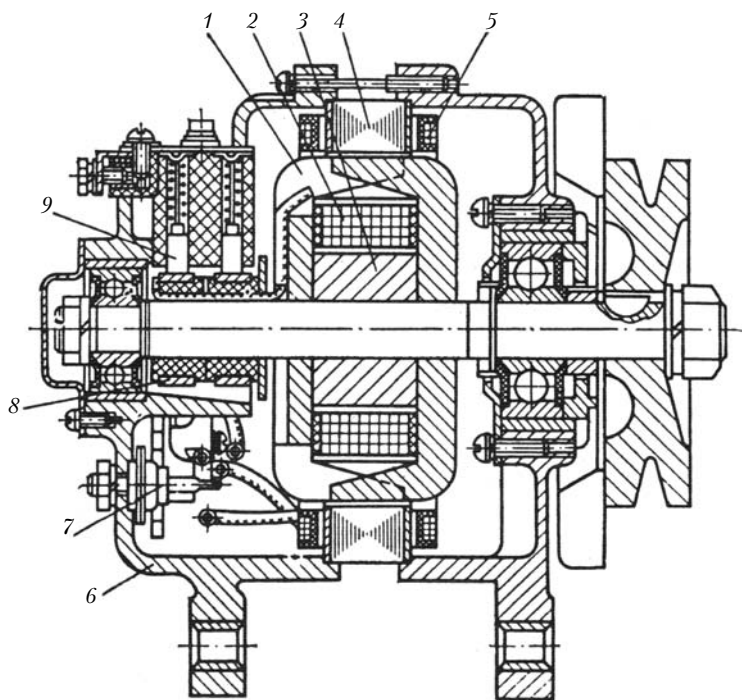


Рис. 4.86. Автомобильный генератор Г-250

независимые переменные токи, так и коэффициенты перед переменными — параметры L и M . В уравнениях электро-механического преобразования энергии есть члены вида $\frac{d}{dt} L_i$ и $\frac{d}{dt} M_i$.

В большинстве электрических машин по гармоническим законам изменяются и токи, и параметры. Преобразование энергии происходит, если изменяются токи, а коэффициенты перед переменными — постоянные. Электро-механическое преобразование также возможно, если изменяются L и M , а токи — постоянные. Такие электрические машины называются параметрическими или индукторными машинами.

В индукторных машинах преобразование энергии происходит вследствие изменения взаимной индуктивности между ротором и статором. В индукторной машине все обмотки неподвижны, а изменение магнитного потока, пронизывающего обмотку статора, вызывается перемещением фер-

ромагнитной массы. Ротор в виде звездочки вызывает изменение проводимости зазора под зубцом статора от максимального значения, когда зубец ротора совпадает с зубцом статора, до минимального, когда впадина (паз) ротора совпадает с зубцом статора. Соответственно меняется и индукция в воздушном зазоре от максимального $B_{\delta\max}$ до минимального значения $B_{\delta\min}$. Следовательно, индукторной машиной можно называть электрическую машину переменного тока, у которой в режиме холостого хода магнитная индукция в любой точке внутренней поверхности статора изменяется только по амплитуде, не изменяясь по знаку.

На рис. 4.87, *а* показана схема высокочастотного индукторного генератора. Статор генератора явнополюсный, на полюсных наконечниках 1 имеются пазы и зубцы, в которых располагается обмотка переменного тока 2. Обмотка возбуждения 3 катушечная, в ней протекает постоянный ток. Ротор индукторного генератора 4 массивный с числом зубцов $z_2 = \frac{1}{2}z_1$, где z_1 — число зубцов на статоре.

При вращении ротора изменяется проводимость воздушного зазора (рис. 4.87, *б*) и индукция в воздушном зазоре изменяется по трапецеидальному закону (рис. 4.87, *в*). Можно разложить кривую индукции в гармонический ряд и выделить 1-ю гармонику. В обмотке переменного тока за счет изменения индукции наведется ЭДС, равная

$$e = w_k \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_k \Phi_1 \sin \omega t, \quad (4.136)$$

где

$$\Phi_1 = 0,5(\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) \quad (4.137)$$

— амплитуда 1-й гармоники (см. рис. 4.87, *в*).

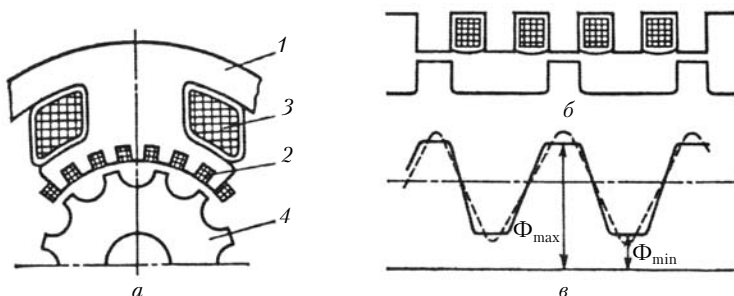


Рис. 4.87. Схема индукторного генератора

Действующее значение ЭДС в обмотке переменного тока

$$E = 2,22 \frac{z_2 n}{60} \omega_k z_s (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}), \quad (4.138)$$

где z_2 — число зубцов на роторе; z_s — число последовательно соединенных катушек.

Высокочастотные индукторные генераторы выполняют частотой в десятки килогерц и мощностью в сотни киловатт. Такие мощности и высокие частоты требуются для электротермических установок, для питания радиолокационных установок и высокоскоростного электропривода.

В индукторном генераторе магнитный поток пульсирует не только в зубцах, но и в ярме, так как при вращении ротора изменяется магнитное сопротивление для потока возбуждения. Чтобы уменьшить пульсации потока в магнитопроводе, индукторные машины выполняют с двумя статорами 1 (рис. 4.88) и двумя магнитопроводами ротора 2, смещенными относительно друг друга таким образом, что общее магнитное сопротивление машины при вращении ротора практически не изменяется, а поток пульсирует только в зубцовых зонах. В индукторном генераторе с аксиальным возбуждением обмотка возбуждения 3 создает поток, замыкающийся в аксиальном направлении, а в зубцовой зоне — в радиальном. Обмотка переменного тока расположена в пазах 4. На индукторе имеются зубцы 5, создающие пульсации индукции в зазоре машины.

Бесконтактные индукторные машины применяются в высокочастотных автономных энергетических системах и изготавливаются на высокие частоты вращения. Индукторные генераторы используются в качестве возбудителей крупных турбогенераторов. Трехфазный высокочастотный возбудитель турбогенератора мощностью 2700 кВ·А, соединенный с валом турбогенератора и работающий на выпрямителе, показан на рис. 4.80.

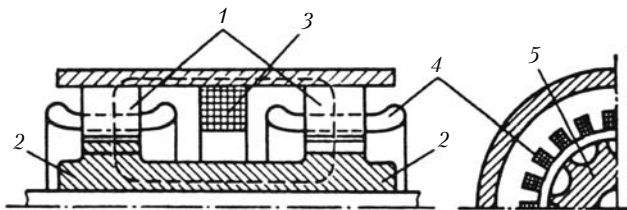


Рис. 4.88. Двухпакетный индукторный генератор

Как и все электрические машины, индукторные машины обратимы. В двигательном режиме они применяются в качестве тихоходных высокочастотных и шаговых двигателей.

Синхронная частота вращения индукторных двигателей зависит от частоты сети и числа зубцов ротора z_2 :

$$n = \frac{f}{z_2}. \quad (4.139)$$

Выполняя на роторе большое число зубцов, при $f = 50$ Гц и $z_2 = 50$, например, частоту вращения получаем 1 об/с, или 60 об/мин. При больших диаметрах ротора и мелких зубцах можно получить частоту вращения до одного оборота в сутки.

Индукторные двигатели выполняют двух-, трех- и однофазными. На обмотку возбуждения подается выпрямленное напряжение или используется схема на рис. 4.81. В индукторных двигателях применяются и постоянные магниты.

В однофазных индукторных двигателях применяются все способы пуска, рассмотренные для обычных однофазных синхронных двигателей.

Индукторные синхронные двигатели серий ДСР и ОРД выпускаются мощностью до сотен ватт и частотой вращения 1,2 и 60 об/мин в трех- и однофазном исполнении [2, 16].

Шаговые двигатели. Шаговые, или импульсные, двигатели питаются импульсами электрической энергии, а ротор в зависимости от полярности импульсов перемещается по часовой стрелке или против часовой стрелки на определенный угол — шаг. Шаговые двигатели обычно маломощные индикаторные. Основная задача их — отрабатывать электрические импульсы, преобразуя электрические сигналы в угловые перемещения.

Для управления шаговыми двигателями используются коммутаторы на полупроводниковых элементах, формирующие импульсы, которые подаются на фазы обмотки шагового двигателя. Число фаз выбирается равным четырем или шести. Шаг двигателя может быть от 180 до 1°. В специальных установках шаг может быть несколько минут.

Шаговые двигатели могут быть выполнены на основе конструкции любых синхронных двигателей. Так как основным требованием к шаговым двигателям являются точность отработки сигналов и высокая частота импульсов, предпочтительны конструкции шагового двигателя, выполненного на базе реактивных и индукторных синхронных машин.

Шаговые двигатели характеризуются предельной частотой импульсов, которые двигатель обрабатывает без пропуска шага. Пусковые свойства шаговых двигателей характеризуются частотой приемистости — максимальной частотой импульсов, при которой возможен пуск без потери шагов. В зависимости от типа шагового двигателя и нагрузки частота приемистости колеблется от 10 до 104 Гц.

Математическое описание процессов преобразования энергии при импульсном питании осуществляется по уравнениям электромеханического преобразования энергии и их видоизменениям, когда форма напряжения — импульсная [7].

Гистерезисные двигатели. Недостатком синхронных двигателей являются их плохие пусковые свойства.

Гистерезисные двигатели сочетают в себе положительные качества асинхронных двигателей (хорошие пусковые характеристики) и синхронных двигателей — высокие энергетические показатели в установившемся режиме.

Сочетание положительных качеств синхронных и асинхронных машин достигается в гистерезисных двигателях за счет применения специальных магнитных материалов, из которых выполняется ротор двигателя. Стали типа викалло — а и альни ведут себя при высоких частотах как магнитомягкие, а при подходе ротора к синхронной частоте вращения, когда частота снижается, — как магнитотвердые. Поэтому при пуске потери в стали ротора небольшие и за счет вихревых токов двигатель развивает асинхронный момент. При низких частотах в роторе образуются области намагничивания и ротор втягивается в синхронизм.

Недостатком гистерезисных двигателей является то, что при нагрузках, близких к номинальным, эти области намагничивания могут «плавать», перемещаться по ротору. При этом машина выпадает из синхронизма.

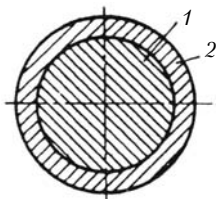


Рис. 4.89. Ротор гистерезисного двигателя

Гистерезисные двигатели выполняются на мощности до десятков ватт. Конструкция статора обычная. Ротор выполняется в виде диска или цилиндра, состоящего из втулки 1, изготовленной из магнитомягкого материала, и магнитопровода 2, изготовленного из викалло или другого магнитного материала, обладающего свойствами, сходными с викаллоем (рис. 4.89).

Синхронные микродвигатели выполняются с катящимся и волновым ротором. Синхронные двигатели могут быть линейными, с сегментным статором, двухмерными и многомерными. Несмотря на обилие их конструктивного выполнения, появляются новые машины. Однако в основе их работы лежат законы электромеханического преобразования энергии.

Синхронная машина двойного питания. Если в асинхронной машине с фазным ротором обмотку статора и ротора подключить к сети таким образом, чтобы поля статора и ротора вращались в противоположные стороны, то можно получить частоту вращения выше синхронной частоты вращения. Неподвижность полей статора и ротора — непреклонное условие, при котором происходит электромеханическое преобразование энергии, будет тогда, когда ротор будет вращаться в сторону вращения поля статора с двойной частотой.

Недостатком машины двойного питания является то, что необходимо при пуске довести угловую скорость ротора до угловой скорости, равной $2\omega_c$, а затем включить напряжение на ротор, т.е. синхронизировать машину. Если подключить ротор к преобразователю частоты, который дает возможность регулировать частоту выходного напряжения, то можно получить регулирование частоты вращения вниз и вверх от синхронной частоты вращения.

Машина двойного питания, хотя и имеет конструкцию асинхронной машины, работает как синхронная. Для нее могут быть построены векторная диаграмма и схема замещения.

Асинхронизированная синхронная машина. При выпадении синхронной машины из синхронизма она переходит в асинхронный режим и частота в роторе $f_2 = f_1 s$. Если подключить ротор к преобразователю частоты и выполнить обмотку возбуждения по продольной и поперечной осям, можно удерживать машину в синхронном режиме, питая двухфазным напряжением обмотки возбуждения от преобразователя частоты. Чем меньше скольжение (отклонение от синхронной частоты вращения), тем меньше мощность преобразователя частоты.

Асинхронизированная синхронная машина сохраняет устойчивость в аварийных режимах и может работать в синхронном и асинхронном режимах.

Важным применением асинхронизированной синхронной машины является ее использование в качестве электро-

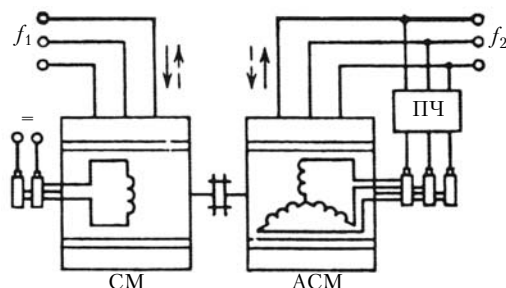


Рис. 4.90. Электромеханическая вставка

механической вставки для связи двух энергосистем, значительно отличающихся по частоте ($f_1 \approx f'$).

Принципиальная схема электромеханической вставки показана на рис. 4.90. Синхронная машина СМ присоединена к сети с частотой f_1 , а асинхронизированная синхронная машина АСМ — к сети с частотой f_2 . Валы синхронной и асинхронизированной машин жестко соединены муфтой, и частота вращения у них одинаковая. Преобразователь частоты ПЧ обеспечивает возбуждение асинхронизированной синхронной машины. При передаче энергии из сети f_1 в сеть f_2 синхронная машина работает в двигательном режиме, а асинхронизированная — в генераторном. При передаче энергии из сети f_2 в сеть f_1 асинхронизированная синхронная машина работает в режиме двигателя, а синхронная — в режиме генератора. Направления мощности на рис. 4.90 показаны стрелками.

Электромеханические вставки улучшают форму кривой напряжения, сглаживают броски токов в переходных режимах. Электромеханические вставки необходимы и при питании ответственных потребителей, когда необходимо отстроиться от высших гармоник, имеющих в сетях при использовании мощных тиристорных преобразователей и других нелинейных нагрузок.

Представляет интерес применение активных электромеханических вставок, когда синхронная и асинхронизированная машины соединены с валом паровой или гидравлической турбины. В этом случае обе машины могут работать в генераторном режиме или в режиме передачи энергии из одной сети в другую, что повышает устойчивость энергосистемы.

4.24. Серии синхронных машин

Одной из задач электромашиностроителей является обеспечение турбо- и гидрогенераторами строящихся электростанций и замена новыми генераторами отработавшие свой срок машины на реконструируемых станциях. Прирост установленной мощности на электростанциях возможен лишь при росте единичной мощности машин, поэтому предельная мощность выпускаемых генераторов свидетельствует о достигнутом техническом уровне электромашиностроения.

В области турбо- и гидрогенераторостроения Россия занимает передовые позиции. Турбогенераторы и гидрогенераторы, изготовленные на наших заводах, являются одними из самых надежных в эксплуатации [17].

Турбогенераторы с непосредственным охлаждением проводников обмотки статора водой и обмотки ротора водородом отечественные заводы выпускают серийно. Машины мощностью 320, 500 и 800 МВт являются основными машинами, которые используются на тепловых и атомных электрических станциях.

Общий вид двухполюсного турбогенератора типа ТВВ-320-2 показан на рис. 4.91.

Технические данные турбогенераторов серии ТВ В приведены в табл. 4.3.

В 1979 г. в ЛПЭО «Электросила» выпущен турбогенератор мощностью 1200 МВт, который находится в эксплуатации на Костромской ГРЭС. На базе этой машины спроектирован и изготовлен турбогенератор 1600 МВт с той же системой охлаждения, что и в машине 1200 МВт.

Предполагается, что в ближайшие десятилетия основной прирост выработки электроэнергии будет идти за счет мощностей атомных станций. На российских атомных электростанциях применяется два типа реакторов: водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР) и многоканальный реактор с графитовым замедлителем (РБМК) одноконтурного

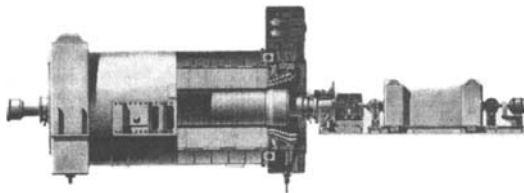


Рис. 4.91. Турбогенератор ТВВ-320-2

Таблица 4.3

Тип турбогенератора	Мощность, МВт	Напряжение, кВ	КПД, %	Избыточное давление водорода, 10^5 Па	Индуктивное сопротивление, %				Размеры, м		Масса, т
					x_d''	x_d	x_2	x_0	длина	ширина	
ТВВ-165-2	165	18	98,5	3	21	171	26	10	13,47	4,31	230
ТВВ-200-2	200	15,75	98,6	3	19	190	23	8,6	13,90	4,31	262
ТВВ-320-2	320	20	98,7	3,5	17,2	170	21	8,7	17,18	5,40	340
ТВВ-500-2	500	20	98,74	4	24,3	191	29,6	14,7	18,36	4,87	384
ТВВ-800-2	800	24	98,83	4	30,5	197	37,2	15,9	20,3	6,9	484

типа. Эксплуатируются оба реактора мощностью 1000 МВт и реактор РБМК мощностью 1500 МВт.

Для реакторов ВВЭР выпускается турбогенератор мощностью 1000 МВт. Реакторы РБМК работают в блоке с двумя турбогенераторами по 500 и 800 МВт и одним 1600 МВт.

Турбогенераторы для атомных станций изготавливаются на базе турбогенераторов серии ТВВ с внутренним водяным охлаждением обмоток статора и внутренним водородным охлаждением обмоток ротора. Турбогенератор для атомных станций типа ТБВ-1000-4 мощностью 1000 МВт имеет частоту вращения 1500 об/мин. Из-за низких параметров пара паровую турбину целесообразно выполнять на частоту вращения 1500 об/мин, поэтому турбогенератор изготавливается в четырехполюсном исполнении. Турбогенератор рассчитан на напряжение 24 кВ и имеет КПД, равный 98,8%, $\cos \varphi = 0,9$, переходное реактивное сопротивление $x_d' = 0,5$. Масса ротора 150 т. Турбогенератор имеет увеличенный срок службы и низкий уровень вибрации.

Турбогенераторы для атомных электростанций могут изготавливаться с частотой вращения 1500 и 3000 об/мин. Двухполюсный турбогенератор имеет более высокие технико-экономические показатели. Турбогенератор мощностью 1000 МВт и частотой вращения 3000 об/мин имеет КПД, равный 98,8% при удельной материалоемкости 0,5 кг/(кВ·А), а турбогенератор с частотой вращения 1500 об/мин — 0,6 кг/(кВ·А).

Применение полного водяного охлаждения является прогрессивным направлением в турбогенераторостроении: на ЛПЭО «Электросила» построен турбогенератор ТВВ-800-2 с внутренним водяным охлаждением обмоток статора и ро-

тора. Турбогенератор рассчитан на напряжение 24 кВ и имеет $\cos \varphi = 0,9$, КПД, равный 98,8%.

Удельный расход материалов 0,56 кг/(кВ·А). Два таких турбогенератора успешно эксплуатируются на Рязанской ГРЭС. На базе этой машины создан турбогенератор мощностью 1000 МВт.

Проблема повышения мощности турбогенераторов до 2000—2500 МВт может быть решена при использовании сверхпроводников. Еще в 1982 г. во ВНИИэлектромаш разработан и испытан криотурбогенератор мощностью 20 МВ·А и частотой вращения 3000 об/мин. С учетом результатов испытаний этой машины создан криотурбогенератор большей мощности.

Созданы ударные турбогенераторы с низким значением x_d'' номинальной мощностью 100 МВ·А и ударной мощностью 2500 МВ А. Такие генераторы запасают в роторе энергию $2,95 \cdot 10^8$ Дж. Максимальная энергия в импульсе длительностью 0,01 с при двухфазном коротком замыкании на активную нагрузку $0,6 \cdot 10^7$ Дж.

На заводе «Электросила» совместно с ВНИИэлектромаш созданы турбогенераторы с водяным непосредственным охлаждением обмоток статора и ротора, а также с охлаждением магнитопровода статора водой. Такие турбогенераторы имеют небольшие перепады температур в изоляции машины и показали надежную эксплуатацию в течение нескольких лет на Рязанской ГРЭС.

Проведены работы по замене водородного охлаждения на воздушное. В будущем будут выпускаться серии турбогенераторов только с воздушным и водяным охлаждением.

Развитие гидрогенераторостроения в России идет по пути увеличения единичной мощности агрегатов, повышения надежности, совершенствования конструкции и технологии изготовления.

Интенсификация охлаждения активных частей — один из основных факторов, обеспечивающих совершенствование гидрогенераторов. Непосредственное водяное охлаждение обмотки статора водой и форсированное охлаждение обмотки ротора впервые в мировой практике применено в 1961 г. на генераторе 160 МВт для Волжской ГЭС. Впоследствии на базе опыта эксплуатации этого генератора были изготовлены крупнейшие в мире гидрогенераторы для Красноярской ГЭС мощностью 500 МВт и для Саяно-Шушенской ГЭС мощностью 640 МВт.

В табл. 4.4 содержатся данные крупнейших гидрогенераторов.

Таблица 4.4

Название ГЭС, страна	Мощность, МВ·А	Частота вращения, об/мин	Напряжение, кВ	КПД, %	cos φ	Масса, т	Год ввода в эксплуатацию
Красноярская (СССР)	590	93,8	15,75	98	0,85	1650	1967
Саяно-Шушенская (СССР)	711	142,8	15,75	98,37	0,9	1790	1978
Гранд Кули (США)	718	85,7	15	98,6	0,975	3000	1978
Итайпу (Бразилия)	738	92,3	18	98,6	0,95	3200	1983

Водяное охлаждение обмотки ротора впервые применено в 1960 г. на опытном гидрогенераторе, установленном на Волжской ГЭС. В дальнейшем этот способ охлаждения был применен на капсульном гидрогенераторе для Шекснинской ГЭС и на гидрогенераторах для гидростанций Ингурского каскада.

Водяное охлаждение сердечников полюсов успешно применено на опытных капсульных гидрогенераторах Саратовской ГЭС и генераторах, изготовленных в 1975 г. для ГЭС «Дженипег» (Канада) и в 1981 г. для ГЭС «Джердап—Железные ворота II» (Румыния, Югославия).

В табл. 4.5 приведены данные крупнейших капсульных гидрогенераторов.

Проблемы жесткости сердечника статора решаются путем сборки статора в кольцо без стыков на месте установки,

Таблица 4.5

Название ГЭС, страна	Мощность, МВ·А	Частота сети, Гц	Частота вращения, об/мин	Напряжение, кВ	cos φ	Диаметр капсулы, мм	Год ввода в эксплуатацию
Саратовская (СССР)	45,9	50	75	6,3	0,98	8500	1970
«Дженипег» (Канада)	31,2	60	62	4,16	0,9	9400	1976
«Джердап — Железные ворота II» (Румыния, Югославия)	27,55	50	62,5	6,3	0,98	9000	1982
Даугавпилсская ГЭС (Латвия)	42,22	50	115,4	6,3	0,9	6600	Не введена

а также путем специального способа шихтовки сегментов — веерообразного расположения стыков в каждом слое. Для обмоток статора применяется изоляция на терморезистивных связующих. Потери в торцевой зоне гидрогенераторов, установленных на Саяно-Шушенской ГЭС, снижены за счет применения немагнитных нажимных щек полюсов и специальной формы зубцов. Как правило, в настоящее время применяется компоновка гидрогенераторов зонтичного исполнения с ротором безвальной конструкции.

Разработаны и внедрены для гидрогенераторов самые мощные подпятники — на нагрузку $3,5 \cdot 10^7$ Н. Подпятники допускают регулирование эксцентриситета и подачу масла под давлением при пуске и останове генератора. Гидрогенераторы с новыми подпятниками допускают пуск и останов гидрогенератора в течение суток.

На заводе «Электросила» выполнена серия капсульных гидрогенераторов с полным водяным охлаждением. На ряде генераторов внедрены тиристорные системы возбуждения. Проведены работы по созданию гидрогенераторов мощностью 1000 МВт.

Синхронные генераторы общего назначения используются в автономных энергетических установках. Они работают совместно с дизелями или двигателями внутреннего сгорания.

Генераторы серий ЕСС, СГД, СТН изготавливаются в горизонтальном исполнении с явно выраженными полюсами на роторе защищенного или открытого исполнения. Возбудитель сопрягается с валом генератора или имеет клиноременную передачу. Общий вид синхронного генератора СГД показан на рис. 4.92.

Технические данные генераторов серий ЕСС, СГД, СГН на частоту 50 Гц, $\cos \varphi = 0,8$ содержатся в табл. 4.6. Для примера взяты генераторы наименьшей, средней и наибольшей мощности. Генераторы серии ЕСС имеют автоматическую систему регулирования напряжения. Блок регулирования монтируется на корпусе генератора.

В целях обеспечения надежной работы энергосистем необходимо иметь не только резерв генераторной мощности на станциях, но и сбалансированное количество реактивной мощности в энергосистеме.

Для генерирования и потребления избытка реактивной мощности применяются синхронные компенсаторы, которые выполняются на базе синхронных генераторов закры-

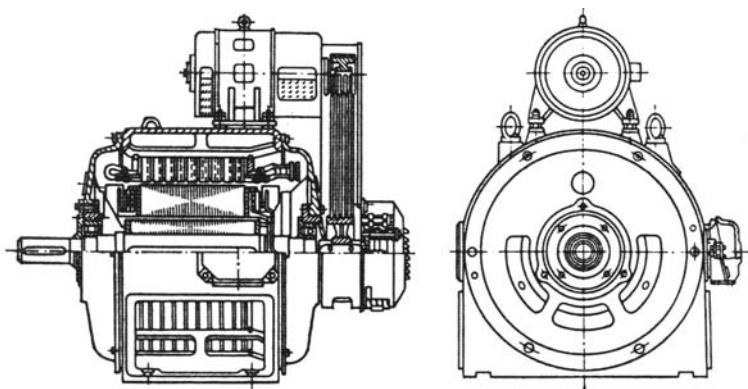


Рис. 4.92. Синхронный генератор СГД

Таблица 4.6

Номинальная мощность, кВт·А	Частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение, кВ	КПД, %	Размеры, м		Масса, т
				длина	ширина	
6,25	1500	0,4	79	0,56	0,398	0,125
500	500	6,3	92,4	3,27	1,73	4,95
4000	600	6,3	96,4	4,71	2,25	19,5

тыми, с воздушным косвенным или водородным охлаждением и предназначены для работы в закрытых помещениях. Предусматривается асинхронный пуск компенсаторов при пониженном (до 40–50%) напряжении [17].

В табл. 4.7 приведены технические данные нескольких синхронных компенсаторов серий КС (с воздушным) и КСВ (с водородным) охлаждением. Максимальную мощ-

Таблица 4.7

Тип компенсатора	Мощность, МВА	Напряжение, кВ	Частота вращения, об/мин	Потери, кВт	Индуктивное сопротивление, %				Размеры, м		Масса, т
					x_d	x'_d	x''_d	x_0	длина	ширина	
КС 10-6	10	6,6	1000	288	185	32	22	10	4,9	3,2	38,5
КС30-11	30	10,5	750	532	160	36	22	9,4	8	3,8	100
КСВ50-11	50	11	750	700	270	47	30	14	6,3	4,3	145
КСВ160-15	160	15,7	750	1765	205	45	21	13	9,2	4,4	303

ность компенсаторы развивают при перевозбуждении (при работе с опережающим $\cos \varphi$).

Синхронные двигатели большой мощности общего назначения выпускаются несколькими сериями и находят применение для приводов насосов, вентиляторов и генераторов постоянного тока [17].

Синхронные двигатели серий СД и СДН изготавливаются явнополюсными, горизонтальными, на двух щитовых или двух стояковых подшипниках, защищенными или открытыми с самовентилиацией. Возбудитель соединен с валом двигателя клиноременной передачей или непосредственно. Технические данные двигателей серий СД и СДН при работе с опережающим $\cos \varphi = 0,9$ представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Напряжение, кВ	КПД, %	Кратность пускового тока	Кратность пускового момента	Размеры, м		Масса, т
						длина	ширина	
75	750	0,38	96	5,65	0,93	1,28	0,828	1,07
1250	1000	6	95,8	6,3	1,3	3,77	1,73	7,45
10 000	600	6	97,2	6,0	1,0	4,91	3,70	47,0

Примечание. Кратность максимального момента для всех двигателей $M_{\max}/M_{\text{ном}} = 1,8 \div 2$.

Для топливно-энергетического комплекса страны выпускаются синхронные двигатели, серий СТД и СТДП мощностью от 630 до 12 500 кВт и частотой вращения 3000 об/мин. Эти двигатели применяются в электроприводах нефтяных насосов и газовых компрессоров, на нефте- и газопроводах, на химических заводах и в других отраслях промышленности.

Двигатели имеют быстродействующую систему тиристорных и бесщеточных возбудителей. Напряжение двигателей 6 и 10 кВ.

В табл. 4.9 содержатся технические данные двигателей серии СТД. Всего в серии 16 двигателей, выполненных на два напряжения и имеющих несколько модификаций.

Турбодвигатели во взрывобезопасном исполнении серий СТД и СТДП выпускаются мощностью 1250—12500 кВт, напряжением 6 и 10 кВ; КПД самого большого двигателя 97,8%, масса 29,5 т.

Для привода мощных воздуходувок доменных печей и конверторов металлургических заводов создаются турбо-

Таблица 4.9

Тип двигателя	Мощность		КПД, %, при		Размеры, м	
	кВт	кВ·А	6 кВ	10 кВ	длина	ширина
СТД-630-2	630	735	95,8	95,6	4,96	2,72
СТД-2500-2	2500	2870	97,2	97,0	11,1	2,53
СТД-12500-2	12 500	14 200	97,9	97,8	29,5	5,48

Примечание. Масса двигателей указана для замкнутого цикла вентиляции и без учета массы возбуждителя.

электродвигатели серии ТДС мощностью 20, 40, 63 МВт и более с регулируемой частотой вращения от 0,6 до 1,2 номинальной. Двигатели серии ТДС мощностью 20 и 31,5 МВт, напряжением 10 кВ имеют КПД, равный 98%, массу 57 и 83 т.

Синхронные микродвигатели в зависимости от конструкции ротора выпускаются с постоянными магнитами. Синхронные двигатели с постоянными магнитами имеют на роторе пусковую короткозамкнутую обмотку и постоянный магнит. В табл. 4.10 приведены некоторые технические данные синхронных двигателей с постоянными магнитами серии ДС на частоту 50 Гц.

Таблица 4.10

Тип двигателя	Мощность, Вт	Число фаз	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	КПД, %	$\cos \varphi$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{ном}}}$	Масса, кг
ДС-22-1500/750	16	3	380	1500/750	50	0,5	2,88	3,4
ДС-10-1500М	13	3	220	1500	40	0,44	3,5	2
ДС-12	0,25	2	127	3000	7,2	0,92	1,75	0,3

Таблица 4.11

Тип двигателя	Мощность, Вт	Число фаз	Частота, Гц	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Масса, кг
Г-31	4	1	50	220	3000	0,9
Г-33	7	3	50	220	3000	0,9
Г-210	3,5	3	500	40	7500	0,3
Г-506	60	3	50	220	3000	4,0
ГТ-101	0,6	1	400	36	1200	0,15
ГТ-310	25	3	400	200	12000	1,0
ГТ-508	80	3	400	200	6000	3,7

Гистерезисные двигатели выпускаются нескольких серий на частоту 50 и 400 Гц в трех- и однофазном исполнении. В табл. 4.11 представлены некоторые данные отдельных гистерезисных двигателей серий Г и ГТ (нагревостойкие).

Более полные данные о сериях синхронных микродвигателей содержатся в работе [17].

Глава 5

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Процессы преобразования энергии в машинах постоянного тока

Электрические машины по типу питания делятся на машины переменного и постоянного тока. Машины постоянного тока подключаются к сети постоянного тока. В автономных системах машина постоянного тока является источником постоянного тока в генераторном режиме, а в режиме двигателя потребляет энергию от источника постоянного тока.

Из модели обобщенной электрической машины (см. рис. 1.25) машину постоянного тока можно получить, если якорь с двухфазной обмоткой подключить через преобразователь частоты, а обмотку возбуждения — непосредственно к сети постоянного тока (см. рис. 1.28). Как и во всех электрических машинах, в машинах постоянного тока поле якоря и поле статора (поле возбуждения) неподвижны относительно друг друга.

В машинах постоянного тока преобразование постоянного тока в многофазный переменный ток осуществляется механическим преобразователем частоты — коллектором. Собственно к машинам постоянного тока и относятся коллекторные машины постоянного тока. Машины, в которых преобразование частоты осуществляется полупроводниковыми преобразователями, называют вентильными машинами или машинами с полупроводниковыми коммутаторами; они имеют и еще ряд названий.

Процессы преобразования энергии в машинах постоянного тока начнем рассматривать со схемы машины с тороидальной граммовской обмоткой (рис. 5.1). В этой машине каждый виток обмотки якоря присоединен к коллекторной пластине. Коллекторные пластины осуществляют последовательное соединение витков обмотки якоря.

В машине постоянного тока число секций обмотки якоря равно числу коллекторных пластин. Секция состоит из одного или нескольких витков, соединенных последовательно.

Коллекторные пластины изолированы друг от друга и образуют цилиндр, по которому при вращении машины скользят щетки. К неподвижным щеткам подводится постоянное напряжение. Щетки и цилиндр из коллекторных пластин образуют коллекторно-щеточный узел. Секции обмотки выводятся на коллекторные пластины для обеспечения надежной работы машины. Принципиально щетки могут скользить непосредственно по проводникам обмотки. Без цилиндра, состоящего из коллекторных пластин, изолированных друг от друга, и были выполнены первые машины в конце XIX в. Обычно, когда говорят о коллекторе, имеют в виду также узлы, обеспечивающие необходимые для удовлетворительной коммутации механические и электрические свойства.

Число щеток на коллекторе равно числу полюсов машины. Как нельзя сделать машину только с северным или южным полюсом, так нельзя иметь одну положительную или отрицательную щетку.

Ток в обмотке якоря машины делится на две параллельные ветви, число параллельных ветвей обмотки a равно числу пар полюсов p . Число параллельных ветвей обмотки $2a = 2p$ (см. рис. 1.57).

При вращении якоря машины секции (витки) обмотки переходят из одной параллельной ветви в другую. При этом в них изменяется направление тока. Процесс перехода секции из одной параллельной ветви в другую называется коммутацией. При коммутации изменяется ток в коммутируемых секциях, а ток в параллельных ветвях и поле якоря, создаваемое токами якоря, практически не изменяются. Амплитуда пульсаций тока в параллельных ветвях зависит от числа секций обмотки якоря, включенных последовательно и со-

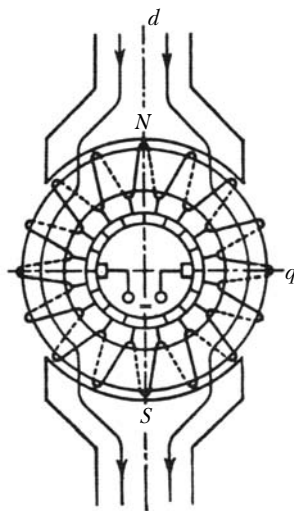


Рис. 5.1. Машина постоянного тока с тороидальной обмоткой якоря

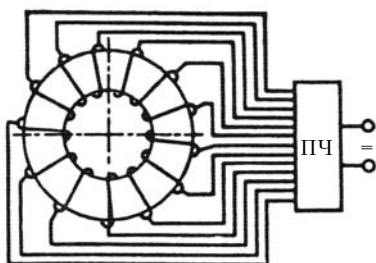


Рис. 5.2. Машина постоянного тока с полупроводниковым коммутатором

ставляющих параллельные ветви обмотки якоря, и числа секций, находящихся в коммутации.

Эквивалентной схемой с полупроводниковым коммутатором, заменяющей принципиальную схему машины постоянного тока (см. рис. 5.1), является схема машины, показанная на рис. 5.2. В этой схеме секции обмотки якоря присоединены к пре-

образователю частоты ПЧ, преобразующему постоянный ток в многофазный переменный.

Обращаясь к рис. 5.2, можно считать, что число фаз m в машине постоянного тока равно числу секций обмотки якоря. Как очевидно из схемы, приведенной на рис. 5.2, секции обмотки машины постоянного тока образуют фазу. Фаза — это угол между напряжениями в многофазной системе напряжений или угол между соседними секциями. Максимальное число векторов напряжений в обмотке якоря машины постоянного тока определяется числом секций обмотки или числом коллекторных пластин (см. рис. 5.1).

Как и в машинах переменного тока, частота тока в секциях обмотки якоря определяется числом пар полюсов и частотой вращения $f = \frac{pn}{60}$.

Если в многофазной машине переменного тока ток в фазе, как правило, изменяется по синусоидальному закону, то в машине постоянного тока изменение тока и напряжения в секции (фазе) близко к прямоугольному (рис. 5.3). Время коммутации T_k составляет милли- и микросекунды, а один оборот якорь совершает за доли секунды, поэтому частота напряжения в секциях составляет десятки или сотни герц. Трапецеидальную кривую напряжения в фазе машины постоянного тока можно разложить в гармонический ряд и выделить 1-ю гармонику.

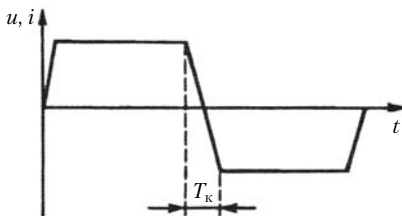


Рис. 5.3. Изменение тока и напряжения в секции обмотки якоря

Переменные токи в многофазной обмотке якоря создают вращающееся поле, которое неподвижно относительно обмотки возбуждения, так как частота вращения поля якоря относительно якоря равна частоте вращения якоря ($\omega_c = \omega_p$). Многофазная обмотка якоря машины постоянного тока может быть приведена к двухфазной.

Как правило, щетки в машинах постоянного тока устанавливаются на геометрической нейтральной — линии, перпендикулярной оси полюсов (см. рис. 5.1), поэтому поле якоря перпендикулярно силовым линиям поля возбуждения. В первом приближении можно считать, что в ненасыщенных машинах постоянного тока при нагрузке имеет место продольно-поперечное намагничивание и поле якоря не влияет на поле возбуждения, т.е. поле в машине постоянного тока при нагрузке искажается, а поток остается таким же, как и при холостом ходе, когда ток в якоре равен нулю. Процессы преобразования энергии в машинах постоянного тока ближе всего к процессам преобразования энергии в синхронных машинах при чисто активной нагрузке.

Как и все электрические машины, машины постоянного тока обратимы, т.е. они могут работать в генераторном и двигательном режимах.

Двигатели постоянного тока обеспечивают большие пределы регулирования частоты вращения при высоких энергетических показателях и механических характеристиках, удовлетворяющих требованиям большинства механизмов. Двигатели постоянного тока используются на транспорте (электровозы, тепловозы, трамвай, троллейбус, мотор-колеса), в станках, прокатных станах, кранах, судовых установках и др. Двигатели постоянного тока широко применяются также в авиации, автомобилях, тракторах и космической технике. Они могут получать питание от аккумуляторных батарей и солнечных элементов. Многие автономные энергетические системы — системы постоянного тока, и двигатели постоянного тока в них находят все большее применение.

Генераторы постоянного тока применяются для питания электролизных и гальванических установок и питания обмоток возбуждения синхронных машин. Во многих автономных установках генераторы постоянного тока вырабатывают большую часть мощности, необходимую для обеспечения электродвижения судов, тепловозов и других передвижных установок. Широко распространены генераторы со специальными характеристиками, необходимыми для сварки, ос-

вещения поездов, привода экскаваторов, получения мощных импульсов и других применений. Постоянное напряжение можно получить, используя синхронный генератор, работающий на выпрямители. Такие системы не имеют коллектора и широко применяются в автономных энергосистемах.

Недостатком машин постоянного тока является их относительно высокая стоимость, а также наличие скользящего контакта в виде щеток и коллектора. Механический преобразователь частоты — коллектор встроен в машину и составляет с ней единое целое. Наличие встроенного преобразователя частоты и определяет несколько более высокую стоимость машины постоянного тока по сравнению со стоимостью асинхронных и синхронных машин.

Несмотря на усилия больших коллективов, направленные на создание преобразователей частоты на полупроводниковых приборах, электроприводы с такими преобразователями и асинхронными или синхронными двигателями в 1,5–2,5 раза тяжелее и дороже электроприводов с двигателями постоянного тока. В истории электромашиностроения было несколько периодов, когда считали, что машины постоянного тока должны будут уступить свое место машинам переменного тока. Однако этого не произошло — выпуск машин постоянного тока неизменно увеличивается и они находят все новые области применения. Машины постоянного тока в будущем будут применяться, и изучение теории и практики их применения имеет важное значение.

5.2. Уравнения машин постоянного тока

Машины постоянного тока — многообмоточные электрические машины. На статоре машины может быть выполнено несколько обмоток возбуждения: обмотка независимого возбуждения w_b , обмотка последовательного (сериесная) w_c или параллельного возбуждения (шунтовая) $w_{ш}$, компенсационная обмотка w_k , обмотка добавочных полюсов $w_{д.п}$ (рис. 5.4). Хотя на якоре и располагается одна обмотка, иногда необходимо учитывать контуры вихревых токов. В переходных процессах следует учитывать контуры в стальных частях магнитопровода статора.

Упрощенная схема машины постоянного тока показана на рис. 5.5. Многофазная обмотка якоря приведена к двухфазной и обозначена $w_{ад}$ и $w_{яq}$. Как и синхронные, машины постоянного тока лучше исследовать в координатах d, q . Для

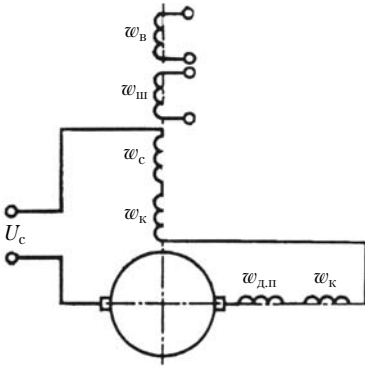


Рис. 5.4. Схема машины постоянного тока

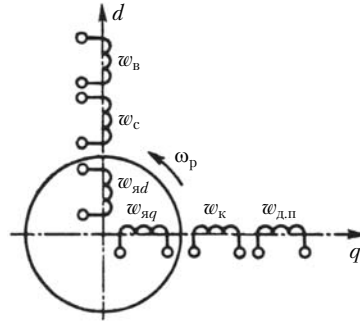


Рис. 5.5. Математическая модель машины постоянного тока

машины, схема которой показана на рис. 5.5, могут быть записаны следующие дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + r_B i_B, \\ u_C = \frac{d\Psi_C}{dt} + r_{я} i_C, \\ u_{д.п} = \frac{d\Psi_{д.п}}{dt} + r_{я} i_{д.п}, \\ u_K = \frac{d\Psi_{БК}}{dt} + r_{я} i_K, \\ u_{я} = \frac{d\Psi_{я}}{dt} + r_{я} i_{я} + e, \end{cases} \quad (5.1)$$

где $u_B, u_C, u_{д.п}, u_K, u_{я}$ — соответственно напряжения на обмотке независимого возбуждения, последовательного возбуждения, добавочных полюсов, компенсационной обмотки и обмотки якоря; $i_B, i_{я}$ — токи в обмотке независимого возбуждения и в якоре (в обмотках $w_C, w_{д.п}, w_K$, соединенных последовательно с якорем, протекает ток якоря), при этом токи в обмотках $w_{яd}$ и $w_{яq}$ одинаковые, равные $i_{я}$; $r_B, r_C, r_{д.п}, r_K, r_{я}$ — активные сопротивления обмотки независимого возбуждения, последовательного возбуждения, добавочных полюсов, компенсационной обмотки и обмотки якоря; e — ЭДС вращения:

$$e = c\omega_p\Phi, \quad (5.2)$$

здесь c — коэффициент, зависящий от конструкции машины; Φ — магнитный поток в зазоре; ω_p — частота вращения

якоря. Падение напряжения под щетками учитывается в ЭДС вращения; $\Psi_B, \Psi_C, \Psi_{д.п}, \Psi_K$ и $\Psi_{я}$ — потокосцепления обмотки независимого, последовательного возбуждения, добавочных полюсов, компенсационной обмотки и обмотки якоря;

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_B}{dt} = L_B \frac{di_B}{dt} + M_{B,C} \frac{di_C}{dt} + M_{B,я} \frac{di_{я}}{dt}, \\ \frac{d\Psi_C}{dt} = L_C \frac{di_C}{dt} + M_{C,B} \frac{di_B}{dt} + M_{C,я} \frac{di_{я}}{dt}, \\ \frac{d\Psi_{д.п}}{dt} = L_{д.п} \frac{di_{я}}{dt} + M_{д.п.К} \frac{di_K}{dt} + M_{д.п.я} \frac{di_{я}}{dt}, \\ \frac{d\Psi_K}{dt} = L_K \frac{di_K}{dt} + M_{К,д.п} \frac{di_{д.п}}{dt} + M_{К,я} \frac{di_{я}}{dt}, \\ \frac{d\Psi_{ад}}{dt} = L_{ад} \frac{di_{я}}{dt} + M_{я,с} \frac{di_{с}}{dt} + M_{я,п} \frac{di_{п}}{dt}, \\ \frac{d\Psi_{яq}}{dt} = L_{яq} \frac{di_{я}}{dt} + M_{я,К} \frac{di_K}{dt} + M_{я,д.п} \frac{di_{д.п}}{dt}, \end{array} \right. \quad (5.3)$$

где $L_B, L_C, L_{д.п}, L_K, L_{ад}$ и $L_{яq}$ — полные индуктивности обмоток; $M_{B,C}, M_{B,я}, M_{C,B}, M_{C,я}, M_{д.п.К}, M_{д.п.я}, M_{К,д.п}, M_{К,я}, M_{я,с}, M_{я,п}, M_{я,К}, M_{я,д.п}$ — взаимные индуктивности между обмотками. Индексы обмоток характеризуют взаимные индуктивности. Например, $M_{C,я}$ — взаимная индуктивность между серийной обмоткой и обмоткой якоря и т.п.

Обмотка якоря машины постоянного тока имеет одну пару щеток, расположенных на геометрической нейтрали. Для определения напряжения на щетках достаточно знать потокосцепления по продольной оси. В системе (5.1) для определения $u_{я}$ принимается потокосцепление обмотки якоря по продольной оси машины. В системе (5.3) записаны потокосцепления обмотки якоря по продольной и поперечной осям машины. При этом учитывается влияние тока якоря на поле машины по продольной и поперечной осям машины.

Подставив значения потокосцеплений в систему (5.1), получим уравнения напряжений машины постоянного тока. Уравнение электромагнитного момента будет включать все произведения токов по продольной и поперечной осям машины. Система уравнений напряжений и уравнения движения, как и для других типов электрических машин, будет описывать процессы преобразования энергии в переходных и установившихся режимах. Однако эти уравнения достаточно

громоздкие, с нелинейными коэффициентами и редко применяются для исследования машин постоянного тока.

При изучении машин постоянного тока для анализа процессов преобразования энергии достаточно рассмотреть простейшую схему с одной обмоткой возбуждения на статоре и одной обмоткой на роторе (рис. 5.6). Для схемы рис. 5.6 можно записать следующие уравнения:

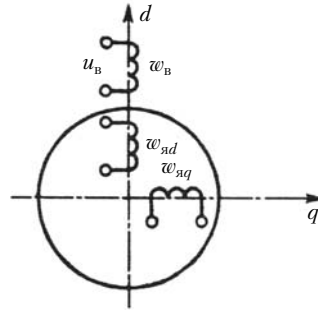


Рис. 5.6. Упрощенная математическая модель

$$\begin{cases} u_b = L_b \frac{di_b}{dt} + M_{b,я} \frac{di_я}{dt} + i_b r_b, \\ u_я = L_я \frac{di_я}{dt} + M_{я,в} \frac{di_b}{dt} + i_я r_{ц,я} + e, \end{cases} \quad (5.4)$$

где u_b , $u_я$ — напряжения на обмотках возбуждения и якоря (рассматривается только напряжение якоря по продольной оси машины, которое обозначено $u_я$); L_b , $L_я$ — полные индуктивности обмоток возбуждения и якоря; $M_{b,я}$, $M_{я,в}$ — взаимные индуктивности между обмотками возбуждения и якоря и обмотками якоря и возбуждения; $r_{ц,я}$ — активное сопротивление цепи обмотки якоря:

$$r_{ц,я} = r_b + r_c + r_{д,п} + r_k, \quad (5.5)$$

которое включает активные сопротивления обмоток якоря, последовательной обмотки возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной обмотки. Падение напряжения под щетками входит в систему (5.4) в ЭДС вращения e .

Чтобы от дифференциальных уравнений (5.4), описывающих переходные и установившиеся режимы, перейти к уравнениям установившегося режима, достаточно в (5.4) приравнять члены с производными нулю, а не умножать их на $j\omega$, как это делалось в машинах переменного тока. Так как машина подключена к сети постоянного тока и расчеты ведутся по току якоря, протекающему по отношению к преобразователю частоты — коллектору со стороны постоянного тока, анализ процессов преобразования энергии в установившемся режиме можно вести только с учетом постоянных токов.

Уравнения машины постоянного тока в установившемся режиме из уравнения (5.4):

$$U_{\text{в}} = I_{\text{в}} R_{\text{в}}; \quad U^* = E \pm I_{\text{я}} R_{\text{я}}; \quad (5.6)$$

$$E = c \omega_{\text{р}} \Phi, \quad (5.7)$$

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения и регулирующего резистора, включенного в контур возбуждения; $R_{\text{я}}$ — внутреннее сопротивление машины, включающее все последовательные сопротивления в цепи якоря; E — ЭДС вращения (напряжение при холостом ходе машины), (5.2).

При нагрузке поле в машине создается как током обмотки возбуждения, так и током якоря. Результирующий поток в машине зависит от нагрузки и схемы соединения обмоток возбуждения (см. рис. 5.4). Чтобы избежать значительного влияния тока нагрузки на поле возбуждения, в машинах постоянного тока выполняют компенсационную обмотку. При изменении нагрузки поток в воздушном зазоре изменяется: $\Phi = f(I_{\text{в}}, I_{\text{я}})$. Изменение потока при изменении нагрузки учитывается при конструировании машин постоянного тока.

По существу (5.6), (5.7) и нелинейная зависимость магнитного потока от токов, протекающих в обмотках машины, и являются математической моделью процессов преобразования энергии в машинах постоянного тока.

В генераторном режиме $E > U$, где U — напряжение сети. В двигательном режиме $U > E$. Поэтому в уравнении (5.7) перед падением напряжения на внутреннем сопротивлении стоят знаки «+» и «-».

Момент на валу машины постоянного тока

$$M_{\text{эм}} = c \Phi I_{\text{я}}. \quad (5.8)$$

Уравнения могут быть получены из представления машины в виде четырехполюсника с двумя электрическими и двумя механическими выводами (рис. 5.7). В машине, представленной на рис. 5.7, так же как и в машинах переменного тока, на электрических выводах присутствует частота f , которая может быть отнесена к сети ($f = 0$) или к токам в обмотке якоря, где $f = \frac{pn}{60}$.

При холостом ходе генератора постоянного тока ($I_{\text{я}} = 0$) поле в машине создается обмоткой возбуждения, в которой

* Далее для упрощения записи индекс «я» у напряжения U будет опущен.

протекает постоянный ток $I_{\text{я}}$. При этом $U = E$. Электродвижущая сила вращения (или противо-ЭДС) уравнивает напряжение сети. В генераторном режиме для машины с независимым возбуждением ток в якоре генератора

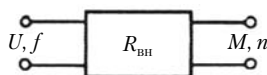


Рис. 5.7. Простейшее представление машины постоянного тока как четырехполюсника

$$I_{\text{я}} = \frac{E - U}{R_{\text{вн}}}. \quad (5.9)$$

Механическая энергия, подводимая к валу машины, преобразуется в электрическую.

В двигательном режиме электрическая энергия преобразуется в механическую. Ток в двигательном режиме

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{вн}}}. \quad (5.10)$$

В режиме работы двигателем при холостом ходе машина потребляет электрическую мощность из сети, которая идет на покрытие потерь холостого хода, и $I_{\text{я}} \neq 0$, а $U \neq E$.

5.3. Конструкции машин постоянного тока

Якорь Пачинотти — Грамма (см. рис. 5.1) имеет ряд недостатков — плохое использование меди, трудоемкость изготовления. Чтобы улучшить использование меди, части секций обмотки, лежащие на внутренней части якоря, которые не пересекают силовых линий магнитного поля, необходимо вынести на наружную часть якоря. Это выполнено в барабанном якоре, в котором секции обмотки лежат на внешней части цилиндрического якоря (см. рис. 1.55). Практически все современные машины имеют цилиндрический якорь с пазами на его внешней поверхности. Приведение граммовских обмоток к двухслойным обмоткам машин постоянного тока рассмотрено в гл. 1.

На рис. 5.8 представлены продольный и поперечный разрезы двигателя серии 2П с тахогенератором серии 2ПАТ. К станине 1 двигателя болтами 2 крепятся главные 3 и добавочные полюсы 4. На валу 5 двигателя находится магнитопровод якоря 6 с обмоткой якоря 7. Секции обмотки якоря присоединены к коллектору 8. На вал двигателя напрессованы вентильатор 9 и балансировочное кольцо 10. Якорь ма-

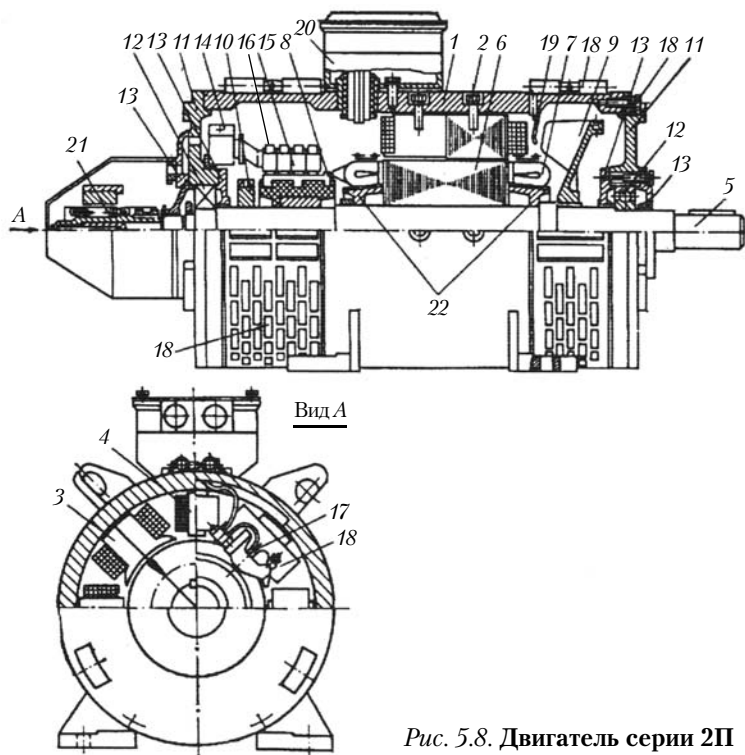


Рис. 5.8. Двигатель серии 2П

шины соединяют со статором подшипниковые щиты 11, в которых находятся подшипники 12, закрепленные крышками 13. К одному из подшипниковых щитов крепится траверса 14, на которой расположены щеточные пальцы 15 со щеткодержателями 16. В щеткодержателях находятся щетки 17, обеспечивающие при вращении скользящий контакт с коллектором.

Охлаждение двигателя осуществляется вентилятором, который прогоняет воздух через машину от подшипникового щита, на котором крепится траверса со щетками, через промежутки между обмотками главных и добавочных полюсов к другому щиту машины. Воздух в машину засасывается через отверстия в защитной ленте 18, расположенные у щита со щетками, и выбрасывается через отверстия в станине, закрытые лентой у другого щита. Направление потока воздуха обеспечивается диффузором 19. На станине машины находится также коробка выводов 20, а для измерения

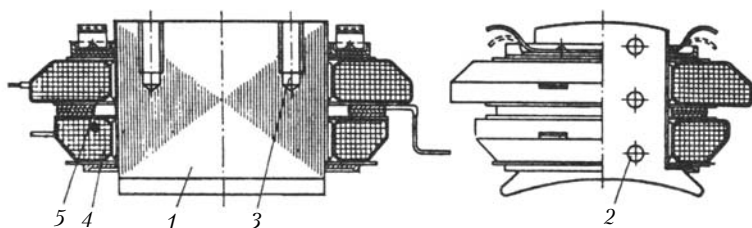


Рис. 5.9. Конструкция обмоток возбуждения

частоты вращения на подшипниковом щите укреплен тахогенератор 21. Обычно тахогенератор выполняется на базе генератора постоянного тока, имеющего линейную зависимость выходного напряжения от частоты вращения.

Обмотки возбуждения расположены на главных полюсах (рис. 5.9). Полюсы 1 собираются из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5—2 мм и крепятся шпильками 2. Иногда полюсы выполняются литыми. В полюсах имеются отверстия с резьбой 3 для крепления полюсов к станине. Катушки обмотки независимого или параллельного возбуждения 4 выполняются из относительно тонкого провода, а катушки обмотки последовательного возбуждения 5 — из проводов большого сечения, так как по ним протекает ток якоря.

Катушки возбуждения укрепляются на полюсах с помощью изоляционных прокладок и клиньев. Катушки отделены друг от друга каналами, которые обеспечивают лучшее охлаждение обмоток возбуждения.

Для намотки катушек обмоток возбуждения применяют провода круглого и прямоугольного сечения.

Добавочные полюсы расположены между главными полюсами и предназначены для обеспечения удовлетворительной коммутации, что является необходимым условием для надежной работы машины постоянного тока.

В машинах постоянного тока станина является одновременно ярмом статора и в ней замыкается поток возбуждения. Ярмо выполняется из стального литья, проката, а в машинах небольшой мощности — из труб. В некоторых случаях для обеспечения быстродействия ярмо выполняется шихтованным.

Сердечник якоря набирается из таких же штампованных дисков электротехнической стали толщиной 0,5 мм, как и в машинах переменного тока. В листах сердечника имеются пазы,



Рис. 5.10. Магнитопровод якоря машины постоянного тока большой мощности

отверстия для вала и вентиляционные каналы. В зависимости от мощности пазы выполняются открытыми или полузакрытыми. Закрытые пазы в машинах постоянного тока не применяются. Форма паза зависит от мощности машины и используемого провода. Провода обмотки якоря, как правило, медные.

В машинах постоянного тока большой мощности, имеющих диаметр ротора больше 990 мм, сердечник якоря набирают из сегментов, которые прикрепляют к ребрам крестовины якоря (рис. 5.10). Размеры сегментов выбирают исходя из лучшего раскроя листа.

Для крепления к ребрам крестовины в сегментах предусматриваются выступы в форме ласточкиных хвостов или крепление осуществляется клиньями. При переходе от слоя к слою сегменты собирают с перекрытием друг друга, что обеспечивает меньшее магнитное сопротивление и большую механическую прочность.

Сердечник якоря машин средней и большой мощности состоит из пакетов, разделенных друг от друга распорками, которые образуют радиальные вентиляционные каналы. Распорки одновременно выполняют роль ветрениц, которые направляют воздух из аксиальных каналов к периферии якоря.

Обмотку якоря укладывают в пазы и крепят клиньями. Лобовые части внутренними поверхностями опираются на обмоткодержатели 22 (см. рис. 5.8). Для крепления обмотки на внешней поверхности лобовых частей применяют проводочные бандажи.

Коллектор (рис. 5.11) набирают из медных пластин 1, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками 2. Для изоляции пластин от корпуса 3 на нажимные фланцы 4 надевают прессованные миканитовые манжеты 5. Нажимные фланцы стягивают кольцевой гайкой 6. Секции обмотки якоря припаивают к петушкам 7. Коллектор подвергают термообработке таким образом, что он образует монолитную конструкцию, исключаящую биения и вибрации.

По внешней поверхности коллектора скользят щетки, расположенные в щеткодержателях (см. рис. 5.8), которые за счет пружины обеспечивают определенное нажатие щет-

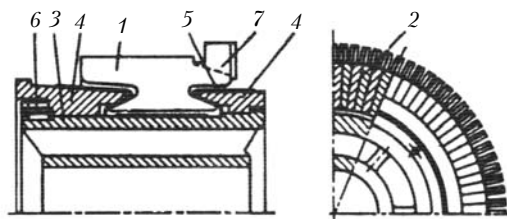


Рис. 5.11. Конструкция коллектора

ки на коллектор и надежный контакт щетки с коллектором при всех режимах работы машины. Щеткодержатели с щетками одной полярности укрепляются на щеточном пальце. Щеточные пальцы разной полярности изолированы друг от друга и смонтированы на общей траверсе. Обычно число щеточных пальцев равно числу полюсов. Щеточные пальцы одной полярности соединяют между собой сборными шинами. Шины подсоединяются к выводам машины.

При нагрузке поле якоря искажает поле возбуждения и может «опрокинуть» его, т.е. под частью полюса поле может изменить направление.

Чтобы скомпенсировать влияние поля якоря, в машинах мощностью 100 кВт и выше выполняется компенсационная обмотка К (рис. 5.12), которая располагается в пазах глав-

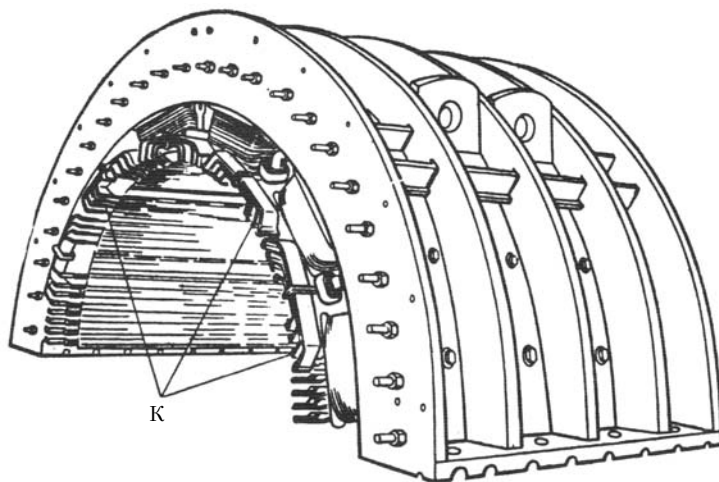


Рис. 5.12. Верхняя часть разъемного статора машины большой мощности

ных полюсов. Магнитодвижущая сила компенсационной обмотки примерно равна МДС поля якоря, и эти МДС действуют встречно, компенсируя друг друга. Поэтому в машинах с компенсационной обмоткой поле в воздушном зазоре при холостом ходе и нагрузке не изменяется.

Конструкция машины определяется в основном мощностью и частотой вращения. Машины постоянного тока изготавливаются мощностью от нескольких ватт до 20 000 кВт, напряжением до 1000 В и частот вращения от десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту.

Двигатели большой мощности индивидуального исполнения изготавливаются в двухъ- и трехъякорном исполнении. На рис. 5.13 показан двигатель типа 2МП 14000-190 ЛПЭО «Электросила» (мощность 14 000 кВт, напряжение 930 В и частота вращения 190/400 об/мин). Двигатель предназначен для привода листовых прокатных станов. На одном валу смонтированы два якоря, обеспечивающие мощность 700 кВт каждый. Машина имеет два статора и общую станину. Двигатели постоянного тока мощностью 1250 кВт и частотой вращения 80 об/мин в одноякорном исполнении выпускаются для приводов шахтных подъемных машин. Выпускаются также двигатели типа 2МП 19600-150 мощностью 14 440 кВт, напряжением 1200 В, ток каждого якоря 6400 А, частота вращения 150/195 об/мин. Двигатель имеет 18 главных и до-

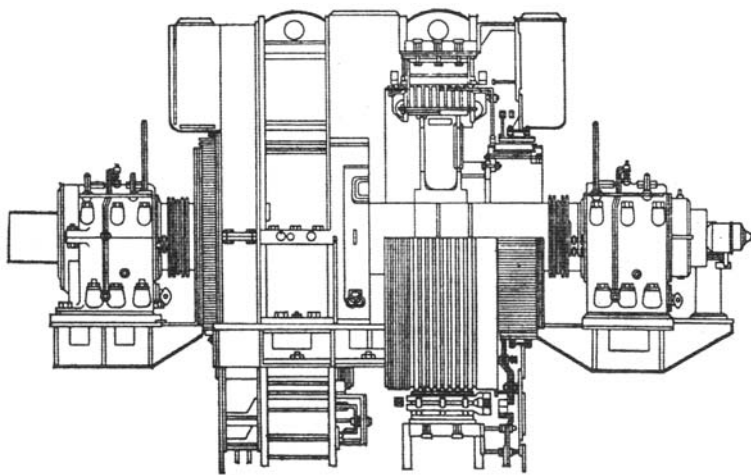


Рис. 5.13. Двухъякорный двигатель 2МП мощностью 14 000 кВт, 190/400 об/мин

полнительных полюсов. Длина машины 7445 мм, наружный диаметр 4500 мм. Масса якоря 80 т, общая масса с охладителями 178 т.

Крупные генераторы постоянного тока изготавливаются мощностью до 10 000 кВт, напряжением 930 В, частотой вращения 500—375 об/мин.

В новой серии машин постоянного тока 4П все конструктивные детали в целях унификации выполнены на базе асинхронных машин серии 4А.

Некоторые конструкции специальных машин постоянного тока рассмотрены в конце этой главы.

5.4. Обмотки якорей машин постоянного тока

Обмотки якорей машин постоянного тока делятся на *простые* и *сложные*. Обмотки, как правило, двухслойные, симметричные. Простые обмотки выполняются петлевыми и волновыми. Сложные состоят из двух-трех простых петлевых или волновых обмоток. Сложная обмотка, объединяющая простую петлевую и волновую обмотки, называется лягушечьей. В многообразных конструкциях машин постоянного тока встречаются и другие разновидности обмоток, но классификация, приведенная выше, охватывает основные виды обмоток машин постоянного тока. Следует иметь в виду, что основные соотношения в математических моделях процессов преобразования энергии практически не зависят от типа обмотки якоря.

На рис. 5.14, а — в представлены секции петлевой, волновой и лягушечьей обмоток.

Секции обмотки образуют катушки, которые укладываются в пазы (см. рис. 1.50). Катушка имеет общую пазовую изоляцию и состоит из одной или нескольких секций. Секция состоит из одного или нескольких витков, виток — из двух или нескольких проводников.

Секции образуют обмотку, которая может состоять из двух или нескольких параллельных ветвей. Каждая ветвь

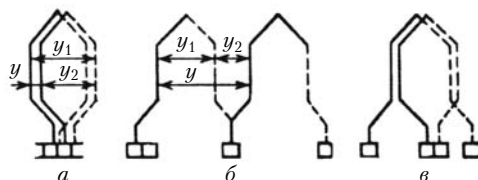


Рис. 5.14. Секции обмоток машин постоянного тока

имеет последовательно соединенные витки и проводники. Последовательно соединенные витки определяют напряжение, а параллельные ветви — ток машины. Общий объем меди при определенной плотности тока характеризует мощность машины постоянного тока.

Число элементарных пазов якоря совпадает с числом секций обмотки якоря и равно числу коллекторных пластин K .

Рассмотрим построение простой петлевой обмотки, для которой шаг $y = 1$, а шаг по коллектору $y_k = 1$. Первый частичный шаг y_1 выбирается близким к полюсному делению: $y_1 \leq \frac{z_p}{2p}$. Вторым частичным шагом y_2 равен $y_1 - y = y_2$.

В реальном пазу может располагаться одна или несколько секций. Если в пазу лежит одна секция, число пазов z равно числу элементарных пазов z_p .

Схема простой петлевой обмотки для $z = z_p = 14$, $2p = 4y = 4$, $y_k = 1$, $y_1 = \frac{z_p}{2p} \pm \varepsilon = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 4$, $y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$, представлена на рис. 5.15.

В простой петлевой обмотке число параллельных ветвей $2a = 2p$, в рассматриваемом случае равно 4. Число щеток равно числу полюсов.

В двухслойной обмотке одна сторона секции лежит на дне паза, а другая — в верхней части паза. Это хорошо видно на схеме рис. 5.16, которая иллюстрирует расположение секций в пазах якоря.

При наличии параллельных ветвей из-за несимметрии воздушного зазора могут возникать уравнивающие токи.

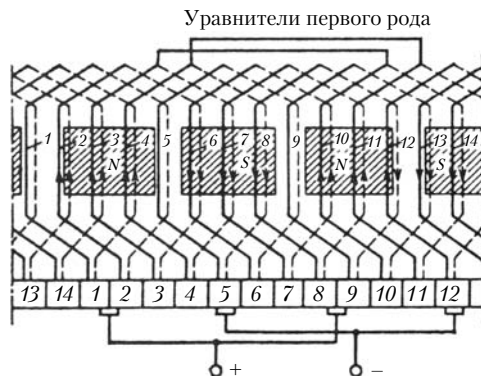


Рис. 5.15. Простая петлевая обмотка
($z_p = k = 14$, $2p = 4$, $y_1 = 4$, $y_2 = 3$)

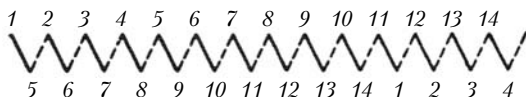


Рис. 5.16. Схема расположения секций в пазах для обмотки рис. 5.15

Эти токи, замыкаясь через щетки одной полярности, могут ухудшить коммутацию машины. Чтобы уравнительные токи не замыкались через щетки, применяют уравнительные соединения, которые соединяют равнопотенциальные точки обмотки (см. рис. 5.15). Технологически удобно уравнительные соединения выполнять, соединяя проводниками коллекторные пластины.

Для удобства на схеме обмотки показано соединение равнопотенциальных точек со стороны лобовых частей обмотки, противоположных коллектору. Такие уравнительные соединения называются уравнительными соединениями первого рода. Следует отметить, что уравнительные токи — токи переменные, так как они замыкаются в обмотке, минуя коллектор. Уравнительные токи создают вращающееся магнитное поле, неподвижное относительно обмотки возбуждения. Поле уравнительных токов уменьшает токи несимметрии, тем самым снижая влияние несимметрии на характеристики машины. Объем меди уравнительных соединений обычно составляет 20÷30% объема якорной обмотки.

На схеме обмотки видно, что секции, которые замыкаются щеткой, коммутируются, т.е. переходят из одной параллельной ветви в другую (от одного полюса к другому). Хотя щетки находятся под серединой полюса, коммутация секций происходит между полюсами в зоне коммутации.

При волновой обмотке обход якоря заканчивается на коллекторной пластине, находящейся слева или справа от пластины, с которой начиналось построение обмотки. Если при обходе происходит смещение на одну пластину влево (на пластину с меньшим номером), обмотка называется перекрещивающейся. В противном случае получается перекрещенная обмотка.

Шаг по коллектору простой волновой обмотки с числом коллекторных пластин K определяется как

$$y_k = y = \frac{K \pm 1}{p}.$$

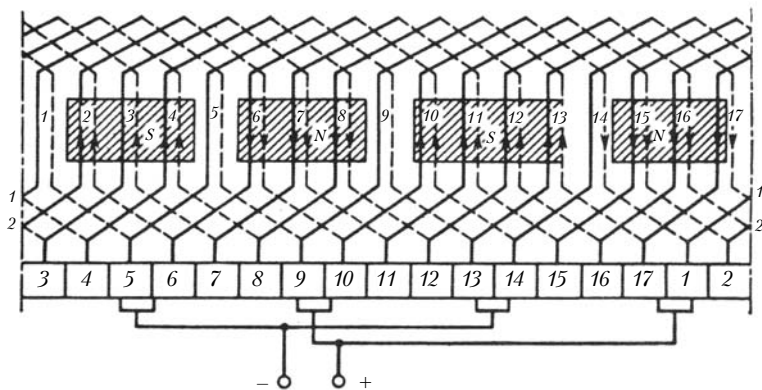


Рис. 5.17. Волновая обмотка ($z_s = k = 17$, $2p = 4$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$)

Знак «-» относится к неперекрыщенной обмотке, а «+» — к перекрыщенной.

Для волновой обмотки, показанной на рис. 5.17, $2p = 4$, $z = z_s = k = 17$,

$$y = y_k = \frac{z_s - 1}{p} = \frac{17 - 1}{2} = 8;$$

$$y_1 = \frac{z_s}{2p} - \varepsilon = \frac{17}{4} - \frac{1}{4} = 4;$$

$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4.$$

Схема простой неперекрыщенной волновой обмотки приведена на рис. 5.17.

На рис 5.18 показана схема расположения секций в верхней и нижней частях пазов якоря.

Число параллельных ветвей в простой волновой обмотке $2a = 2$ и не зависит от числа полюсов. Достоинством волновых обмоток является то, что они не требуют уравнивающих соединений — сами секции обмотки являются уравнивателями, так как стороны секций, соединенных последовательно, находятся на эквипотенциальных образующих цилиндра якоря (см. рис. 5.17).

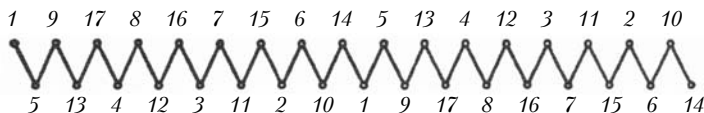


Рис. 5.18. Расположение секций в пазах простой неперекрыщенной волновой обмотки

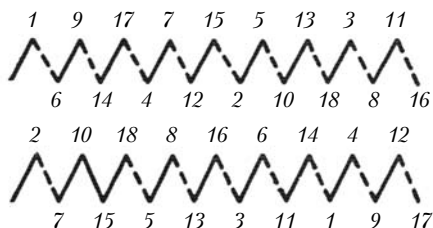


Рис. 5.19. Расположение секций в пазах сложной петлевой обмотки ($z_3 = 20$, $2p = 4$, $m = 2$)

Сложные петлевые обмотки состоят из двух (редко из трех) простых петлевых обмоток. Шаг сложной обмотки $y = y_k = 2$ (при двух обмотках). Шаги y_1 и y_2 определяются так же, как и для простой обмотки. В пропущенные пазы укладывается вторая обмотка сложной петлевой обмотки (рис. 5.19) для $2p = 4$, $z = z_3 = 20$, $m = 2$ (две простые петлевые обмотки). Для сложной петлевой обмотки $y = y_k = 2$, $y_1 = \frac{z_3}{2p} + \varepsilon = \frac{20}{4} + 1 = 6$, $y_2 = 6 - 2 = 4$.

Одна простая обмотка лежит в нечетных пазах и подсоединяется к нечетным коллекторным пластинам. Вторая укладывается в четные пазы и подсоединяется к четным коллекторным пластинам. Две простые петлевые обмотки соединяются параллельно щеткам. Такие обмотки называют иногда двукратно-замкнутыми.

Число параллельных ветвей в сложной обмотке $2a = 2m$. Таким образом, число параллельных ветвей в сложной обмотке удваивается ($m = 2$) или утраивается ($m = 3$). Это дает возможность снизить ток в параллельной ветви в 2 или 3 раза.

Однопотенциальные точки одной простой обмотки соединяются уравнительными соединениями с другой петлевой обмоткой. Такие соединения называются уравнительными соединениями второго рода. Таким образом, в сложных петлевых обмотках применяется два вида уравнительных соединений.

Сложные волновые обмотки обычно состоят из двух простых волновых обмоток, которые укладываются в пазы на одном якоре и присоединяются к одному коллектору. Сложные волновые обмотки из трех простых волновых обмоток практически не применяются.

Число параллельных ветвей в сложных волновых обмотках $2a = 2m$, где m — число простых волновых обмоток.

В сложных волновых обмотках применяются уравнительные соединения второго рода.

На рис. 5.20 показана схема соединений секционных сторон сложной волновой обмотки, имеющей $2p = 4$, $2a = 4$, $z = z_a = k = 18$, $m = 2$, $y_k = y = \frac{18 - 2}{2} = 8$, $y_1 = \frac{18}{4} + \frac{1}{2} = 5$, $y_2 = 8 - 5 = 3$.

Лягушечья обмотка, секция которой показана на рис. 5.14, в, представляет собой объединение простой петлевой и простой волновой обмоток.

При проектировании якорей машин постоянного тока необходимо соблюдать условия, обеспечивающие получение симметричных обмоток:

$$1) \frac{N}{z} = \text{целое число};$$

$$2) \frac{z_a}{a} = \text{целое число};$$

$$3) \frac{k}{a} = \text{целое число};$$

$$4) \frac{2p}{a} = \text{целое число}.$$

При несоблюдении этих условий один элементарный паз может оказаться незаполненным секцией обмотки. В пазу будет свободное место, а коллекторные пластины будут все заняты. В этом случае, чтобы сохранить балансировку якоря, свободное место в пазах заполняется секцией, которая не присоединяется к коллектору и не участвует в создании ЭДС. Такие обмотки называются обмотками с мертвой секцией. Они могут получиться при использовании якоря для новой обмотки во время ремонта машины. При проектиро-

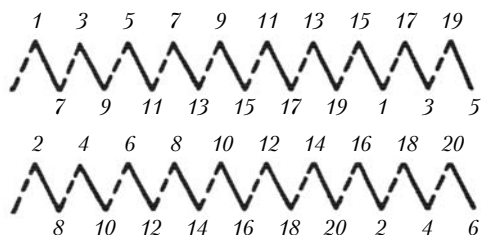


Рис. 5.20. Расположение секций в пазах сложной волновой обмотки ($z_a = 18$, $2p = 4$, $m = 2$)

вании новых машин применение обмоток с мертвой секцией исключается.

При выборе типа обмотки исходят из того, что ток в параллельной ветви не должен превышать 250—350 А. Это определяется рациональным выполнением пазов, коллекторных пластин, а главное, при больших токах не удастся обеспечить удовлетворительные условия коммутации.

Простая петлевая обмотка применяется в низковольтных машинах при больших токах в якоре. Простые волновые обмотки допускают сравнительно низкие токи, так как в них $2a = 2$, но они не требуют уравнительных соединений, что является их достоинством.

Сложные обмотки применяются в машинах большой мощности, когда необходимо иметь большое число параллельных ветвей, а также в машинах с тяжелыми условиями коммутации.

5.5. Холостой ход генератора постоянного тока

При холостом ходе машины постоянного тока, работающей в генераторном режиме, ток в якоре $I_a = 0$, а магнитное поле в воздушном зазоре создается обмоткой возбуждения (рис. 5.21). В машинах постоянного тока не стремятся к синусоидальному полю в воздушном зазоре при холостом ходе, поэтому зазор под полюсным наконечником обычно делают равномерным, а ширину полюсного наконечника берут равной $b_p = 0,65 \div 0,75\tau$. При этих условиях на холостом ходу поле близко к трапецеидальному. Трапецеидальное поле можно при расчетах заменить прямоугольным полем с индукцией B_{cp} . При переходе к индукции B_{cp} поток на полюсном делении остается таким же, как и при трапецеидальном поле

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau l_\delta}, \quad (5.11)$$

где l_δ — активная длина проводника обмотки якоря.

Если обмотка якоря имеет N проводников, а число параллельных ветвей $2a$, то число

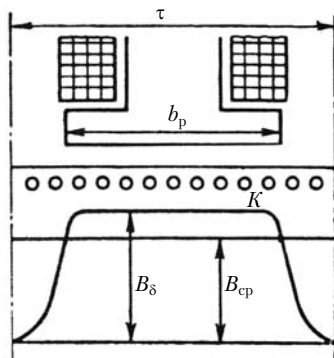


Рис. 5.21. Поле машины постоянного тока при холостом ходе

последовательно включенных проводников в параллельной ветви $\frac{N}{2a}$. Тогда ЭДС якоря

$$E = \frac{2p}{2a} \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} l_{\delta} v = \frac{p l_{\delta} v}{a} \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k}, \quad (5.12)$$

где $B_{\delta k}$ — индукция в воздушном зазоре под k -м проводником.

В выражении (5.12) произведение под знаком суммы представляет собой ЭДС витка

$$e_v = B_{\delta k} l_{\delta} v. \quad (5.13)$$

Так как окружная скорость якоря

$$v = 2\pi n, \quad (5.14)$$

где n — частота вращения якоря, об/с, то ЭДС якоря в отличие от выражения (5.2) может быть выражена через частоту вращения

$$E = \sum_{k=1}^{N/2p} B l_{\delta} v = \frac{N}{2a} B_{\text{ср}} l_{\delta} v = \frac{N}{2a} B_{\text{ср}} l_{\delta} 2\pi n = \frac{Np}{a} B_{\text{ср}} l_{\delta} \pi n = c_e \Phi n. \quad (5.15)$$

В выражении (5.15) постоянный коэффициент

$$c_e = \frac{pN}{a}, \quad (5.16)$$

если n — в об/с, и

$$c_e = \frac{pN}{a60}, \quad (5.17)$$

если n — в об/мин.

Коэффициенты в формулах (5.2) и (5.15) связаны соотношением

$$c = \frac{c_e}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a}. \quad (5.18)$$

Если обмотка выполнена с укороченным шагом, а на

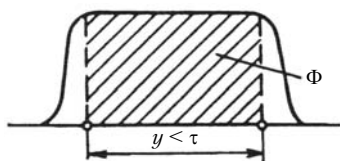


Рис. 5.22. Наведение ЭДС в витке с укороченным шагом $y < \tau$

якоре есть скос пазов, это учитывается уменьшением потока воздушного зазора (рис. 5.22), сцепленного с витком обмотки якоря. В машинах постоянного тока обычного исполнения влияние укорочения и скоса на ЭДС небольшое и не учитывается при расчете.

При определении E можно рассматривать неподвижный якорь и вращающиеся полюсы с обмоткой возбуждения. Естественно, E при этом не изменится. Можно определить E при неподвижной обмотке якоря с учетом того, что в воздушном зазоре вращается магнитное поле Φ . Как и в машинах переменного тока, можно ввести обмоточный коэффициент $k_o = k_p k_y$, равный произведению коэффициентов распределения и укорочения. Коэффициент k_y в обычных машинах постоянного тока близок к единице. Считая, что обмотка якоря распределенная, получаем $k_p = \frac{2}{\pi}$ (отношение диаметра к длине полуокружности).

Магнитную цепь машины рассчитывают при холостом ходе и обычно на один полюс. Магнитная цепь машины постоянного тока, как и других электрических машин, состоит из пяти участков (рис. 5.23). Магнитодвижущая сила на один полюс

$$\Sigma F = F_{\delta(3,4)} + F_{z(4,5)} + F_{m(2,3)} + F_{a(5,6)} + F_{c(1,2)}, \quad (5.19)$$

где $F_{\delta(3,4)}$, $F_{z(4,5)}$, $F_{m(2,3)}$, $F_{a(5,6)}$, $F_{c(1,2)}$ — МДС воздушного зазора, зубцов якоря, полюса, ярма якоря и ярма статора; цифры в индексах соответствуют границам участков.

Магнитодвижущая сила воздушного зазора

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta}, \quad (5.20)$$

где k_{δ} — коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления зазора из-за неравномерного распределения индукции, обусловленного наличием зубцов и пазов на якоре.

При гладкой поверхности полюсного наконечника коэффициент воздушного зазора можно определить по формуле

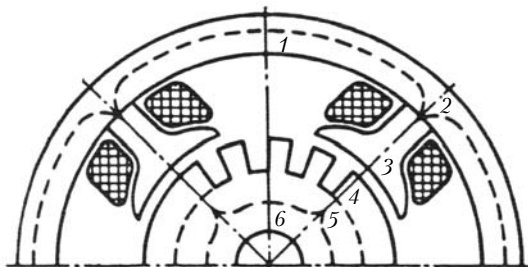


Рис. 5.23. Магнитная цепь машины постоянного тока

$$k_{\delta} = \frac{t_z}{t_z - \gamma \delta}, \quad (5.21)$$

где t_z — зубцовое деление:

$$t_z = \frac{\pi D_{\text{я}}}{Z_{\text{я}}}, \quad (5.22)$$

здесь $D_{\text{я}}$ — диаметр якоря; $Z_{\text{я}}$ — число пазов на якоре. Коэффициент γ :

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{\text{п}}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{п}}}{\delta}}, \quad (5.23)$$

где $b_{\text{п}}$ — ширина раскрытия паза. В машинах с открытым пазом $b_{\text{п}}$ равно ширине паза.

Обычно k_{δ} определяется по полуэмпирической формуле

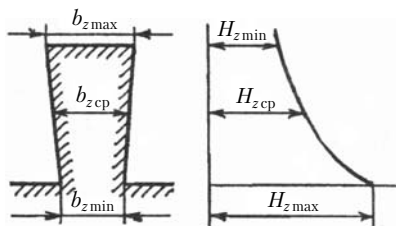
$$k_{\delta} = \frac{t + 10\delta}{b_{\text{п}} + 10\delta}. \quad (5.24)$$

При расчете зубцовой зоны считают, что поток проходит по зубцам. При больших насыщениях зубца часть потока вытесняется в паз. При прямоугольных пазах зубцы якоря трапецевидальные и расчет индукции и МДС осуществляется для трех сечений (рис. 5.24).

Зная ширину зубца $b_{z \max}$, $b_{z \text{cp}}$ и $b_{z \min}$, находим значения индукции в этих сечениях:

$$B_z = \frac{\Phi_z}{b_z l k_{\text{ст}}} = \frac{B_{\delta} t_z l_{\delta}}{b_z l k_{\text{ст}}}, \quad (5.25)$$

где b_z — ширина зубца соответственно в трех сечениях; l — длина машины; l_{δ} — расчетная длина машины (без вентиляционных каналов); $k_{\text{ст}}$ — коэффициент заполнения пакетов сердечника якоря сталью, $k_{\text{ст}} = 0,9 \div 0,94$.



При расчете индукции в воздушном зазоре считают, что индукция в зазоре распределена равномерно, а в зубцах поток проходит по стали.

Определив по кривым или таблицам для данного сорта стали $H_{z \max}$, $H_{z \min}$

Рис. 5.24. К расчету зубцов якоря

и $H_{z\text{cp}}$, найдем среднее значение напряженности в зубце (см. рис. 5.24):

$$H_z = \frac{H_{z\text{min}} + 4H_{z\text{cp}} + H_{z\text{max}}}{6}. \quad (5.26)$$

После этого вычисляем МДС зубцов:

$$F_z = H_z h_z, \quad (5.27)$$

где h_z — высота зубца.

При индукциях, больших 1,8 Тл, необходимо учитывать вытеснение потока в паз, так как при насыщении зубцов часть силовых линий потока замыкается параллельно стенкам паза. При расчете потока в полюсах учитываем поток рассеяния обмотки возбуждения

$$\Phi_m = \Phi_\delta + \Phi_\sigma, \quad (5.28)$$

где Φ_σ — поток рассеяния, замыкающийся вокруг обмотки возбуждения и не сцепленный с обмоткой якоря. Поток рассеяния замыкается вокруг лобовых частей по воздуху и по добавочным полюсам. Поток в полюсе можно определить, зная коэффициент рассеяния обмотки возбуждения, создающий в машине поток при холостом ходе

$$\sigma = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\sigma}. \quad (5.29)$$

В машинах постоянного тока обычно $\sigma = 1,1 \div 1,25$. Меньшие значения σ относятся к машинам без дополнительных полюсов, большие — к многополюсным машинам.

Тогда индукция в сердечниках главных полюсов

$$B_m = \frac{\sigma \Phi_\delta}{l_m b_m k_{\text{ст}}}, \quad (5.30)$$

где l_m, b_m — высота и ширина полюса (рис. 5.25).

Если полюс имеет радиальные и аксиальные каналы, это учитывается коэффициентом заполнения $k_{\text{ст}}$.

По B_m для соответствующего сорта стали находят МДС полюса:

$$F_m = H_m l_m. \quad (5.31)$$

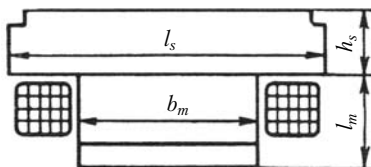


Рис. 5.25. К расчету полюсов и якоря статора

Поток в ярмах статора и якоря делится на две части (см. рис. 5.23).

Индукция в ярме статора

$$B_s = \frac{\sigma \Phi_\delta}{2l_s h_s}, \quad (5.32)$$

где l_s, h_s — длина и высота станины (см. рис. 5.25).

Коэффициент заполнения $k_{ст} = 1$, так как станина обычно литая. Индукция в ярме якоря

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2l_a h_a k_{ст}}, \quad (5.33)$$

где l_a, h_a — длина и высота ярма якоря (расстояние от дна паза до отверстия под вал). Наличие для охлаждения аксиальных и радиальных каналов учитывается коэффициентом заполнения $k_{ст}$ и введением в уравнение (5.33) расчетной длины якоря, учитывающей воздушные промежутки.

Далее по B_s и B_a для соответствующих сортов стали находят H_s и H_a , а затем МДС:

$$F_s = H_s L_s \quad (5.34)$$

и

$$F_a = H_a L_a, \quad (5.35)$$

где L_s, L_a — соответственно длина средних силовых линий в ярме статора и ротора (см. рис. 5.23).

Задаваясь несколькими значениями индукции в воздушном зазоре, проводим расчет магнитной системы и строим кривую намагничивания или магнитную характеристику (рис. 5.26). Как и в других электрических машинах, в машинах постоянного тока характеристика намагничивания имеет две линейные зоны — в начальной части характеристики

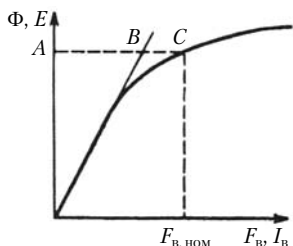


Рис. 5.26. Характеристика намагничивания машины постоянного тока

при небольших токах возбуждения и МДС и при больших насыщениях соответственно при больших токах возбуждения и МДС.

Обычно рабочая точка выбирается на изгибе характеристики. При этих условиях в машине постоянного тока получаются лучшие энергетические характеристики при меньших удельных расходах активных материалов.

Степень насыщения магнитной системы машины характеризуется коэффициентом насыщения

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{F_{\delta}} = 1 + \frac{F_z + F_m + F_a + F_s}{F_{\delta}}. \quad (5.36)$$

Коэффициент насыщения k_{μ} можно определить по характеристике намагничивания (см. рис. 5.26)

$$k_{\mu} = \frac{AC}{AB} = 1 + \frac{BC}{AB}. \quad (5.37)$$

Обычно $k_{\mu} = 1,2 \div 1,5$. В специальных машинах постоянного тока, когда первостепенное значение имеют массогабаритные показатели, коэффициент насыщения может быть $1,7 \div 2,0$.

При проектировании машин постоянного тока сечения участков магнитопроводов выбираются так, чтобы в зубцах якоря в наименьшем сечении индукция лежала в пределах $1,8 \div 2,5$, в сердечнике якоря $1,0 \div 1,5$, в полюсах $1,2 \div 1,6$, а в ярме станины $1,1 \div 1,3$ Тл. Индукция в воздушном зазоре $0,5 \div 1$ Тл.

Определив $\sum F$, найдем ток возбуждения и число витков обмотки возбуждения

$$\sum F = I_{\text{в}} w_{\text{в}}, \quad (5.38)$$

где $I_{\text{в}}$ — ток возбуждения; $w_{\text{в}}$ — число витков обмотки возбуждения на один полюс.

Выбор тока возбуждения и числа витков обмотки возбуждения зависит от системы возбуждения и напряжения в контуре обмотки возбуждения.

5.6. Поле машины постоянного тока при нагрузке

При нагрузке в якоре машины протекает ток и результирующее поле в воздушном зазоре искажается в результате наложения поля якоря на поле возбуждения (рис. 5.27, а — в). Магнитный поток и его пространственное распределение при нагрузке определяются МДС обмоток возбуждения и якоря.

Влияние МДС якоря на поле машины называется реакцией якоря. Если щетки установлены на геометрической нейтрали, реакция якоря поперечная — ось поля якоря совпадает с поперечной осью машины (см. рис. 5.27, б).

Поперечная реакция якоря искажает поле, которое было при холостом ходе. При этом смещается на угол β физиче-

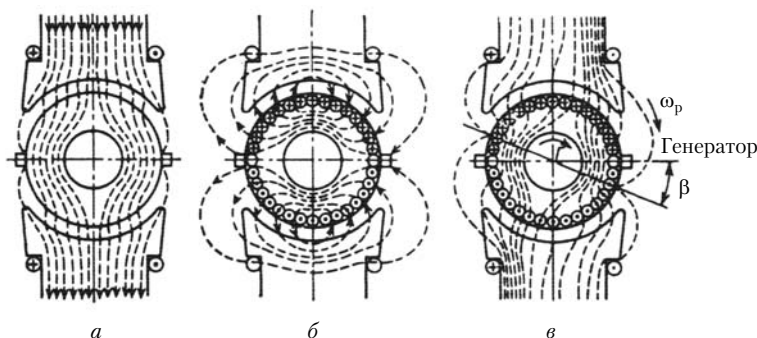


Рис. 5.27. Картины поля при холостом ходе (а), отсутствии тока в обмотке возбуждения (б) и при наложении полей возбуждения и якоря (в)

ская нейтраль — линия, перпендикулярная силовым линиям поля или соединяющая точки на якоре машины, где $B_\delta = 0$ (см. рис. 5.27, в). При холостом ходе физическая нейтраль совпадает с геометрической. В генераторном режиме физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря. В режиме работы двигателем ток в якоре меняет свое направление на обратное и физическая нейтраль смещается в сторону, противоположную вращению якоря.

В генераторном режиме под набегающим краем полюса поле ослабляется, а под сбегающим — усиливается. В режиме двигателя — обратная картина: под набегающим краем полюса поле усиливается, под сбегающим — ослабляется.

Из-за насыщения ослабление поля проявляется сильнее, чем усиление, поэтому поперечная реакция якоря не только

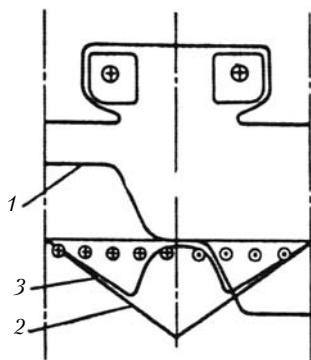


Рис. 5.28. Поле реакции якоря

искажает поле, но и уменьшает результирующий поток при нагрузке по сравнению с потоком при холостом ходе.

Чтобы определить уменьшение поля при нагрузке за счет влияния поперечной реакции якоря, рассмотрим поле реакции якоря в зоне между главными полюсами. Индукция в зазоре при холостом ходе распределена согласно кривой 1 (рис. 5.28). Магнитодвижущая сила обмотки якоря в зазоре

имеет треугольное распределение 2 и проходит через нуль посередине главных полюсов. Из-за большого различия воздушных зазоров по продольной и поперечной осям машины кривая индукции поля 3 якоря отличается от МДС обмотки якоря.

На рис. 5.29 показаны кривые индукции в зазоре от тока обмотки возбуждения 1 и тока обмотки якоря 2 при нагрузке. Кривая индукции в зазоре при нагрузке является результатом сложения кривых 1 и 2. В ненасыщенной машине уменьшение поля под одним краем полюса компенсируется увеличением поля под другим (кривая 3). Но в насыщенной машине при сложении полей увеличение поля происходит на меньшее значение, чем его уменьшение при вычитании полей (кривая 4). Таким образом, поперечная реакция якоря уменьшает результирующий поток на размер заштрихованной площади на рис. 5.29.

Размагничивающее действие поперечной реакции якоря влияет на характеристики машины, и это необходимо учитывать при проектировании и анализе работы машин постоянного тока.

Количественный учет размагничивающего действия поперечной реакции якоря осуществляется графоаналитическим путем. Для определения продольной составляющей поперечной реакции якоря F_{qd} построим частичную или, как

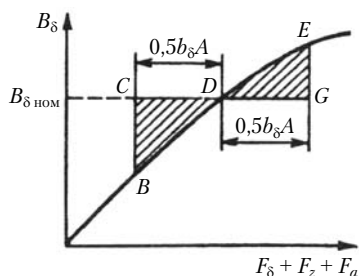


Рис. 5.30. К количественному определению размагничивающего действия реакции якоря

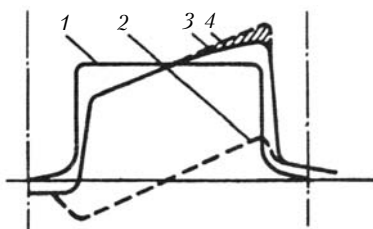


Рис. 5.29. Реакция якоря искажает поле машины, а в насыщенной машине — уменьшает поле

ее иногда называют, переходную характеристику $B_\delta = f(F_\delta + F_z + F_a)$, т.е. зависимость индукции в воздушном зазоре от МДС воздушного зазора и зубцов на один полюс (рис. 5.30). Поток поперечной реакции якоря в воздушном зазоре и зубцах совпадает или направлен встречно с потоком возбуждения и оказывает значительное влияние на результирующее по-

ле, а в полюсах и ярме якоря имеет место продольно-поперечное намагничивание, когда влияние потока реакции якоря ослаблено. Следует иметь в виду, что $F_\delta + F_z + F_a$ при расчете магнитной цепи машины составляет $70 \div 80\% \sum F$ и эти составляющие следует учитывать в первую очередь при расчетах.

Найдя по $B_{\delta \text{ ном}}$ на переходной характеристике рабочую точку D , отложим от нее по прямой в обе стороны отрезки $0,5b_\delta A$, где A — линейная нагрузка, т.е. ток на единицу длины окружности якоря:

$$A = \frac{I_a N}{2\pi D}. \quad (5.39)$$

Здесь b_δ — полюсное перекрытие (полюсная дуга).

Таким образом, $b_\delta A$ характеризует МДС поперечной реакции якоря. При этом считают, что токи якоря, протекающие в витках, расположенных между главными полюсами, не создают поток поперечной реакции якоря, так как в этой зоне имеется большой воздушный зазор.

Треугольник BCD характеризует размагничивающее действие, а треугольник DEG — подмагничивающее действие поперечной реакции якоря. Площадь треугольника BCD больше площади треугольника DEG . Чтобы найти продольную составляющую поперечной реакции якоря F_{qd} , характеризующую размагничивающее действие поперечной реакции якоря, сдвигают вправо треугольники BCD и DEG до тех пор, пока площади новых треугольников $B'C'D$ и $DE'G'$ (рис. 5.31) не станут равными. В этом случае площади прямоугольника $ACGF$, характеризующего поток при холостом ходе, и фигуры $A'B'DEF'$, характеризующей поток

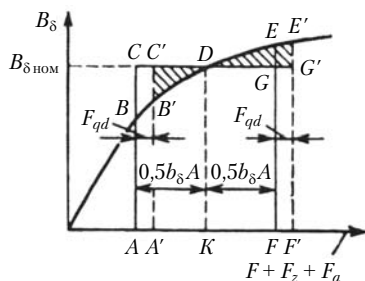


Рис. 5.31. К определению продольной составляющей поперечной реакции якоря F_{qd}

при нагрузке, будут одинаковыми. Магнитодвижущая сила F_{qd} зависит от насыщения и тока в якоря. Аналитическое определение F_{qd} громоздко и дает не меньшие погрешности по сравнению с графоаналитическим способом, который применяется при практических расчетах.

Чтобы компенсировать влияние поперечной реакции якоря, надо к МДС об-

мотки возбуждения, рассчитанной при холостом ходе по выражению (5.19), добавить F_{qd} и тогда МДС обмотки возбуждения будет равна

$$F_b = \sum F + F_{qd}. \quad (5.40)$$

Поперечная реакция якоря зависит от воздушного зазора. Чем больше зазор, тем меньше F_{qd} , так как при большем зазоре стальные участки на вид переходной характеристики влияют слабее. Площади треугольников BCD и DEG близки друг к другу при переходной характеристике, близкой к линейной (см. рис. 5.30). Поэтому для уменьшения F_{qd} лучше выбирать большой воздушный зазор, однако при большом зазоре увеличивается $\sum F$, а следовательно, и объем, и масса меди катушки возбуждения. Оптимальный воздушный зазор в машинах постоянного тока в 5–10 раз больше зазора, который необходим из механических условий.

Для компенсации поперечной реакции якоря можно использовать последовательную обмотку возбуждения с МДС, примерно равной F_{qd} . Такая обмотка, применяемая в двигателях постоянного тока, называется стабилизирующей обмоткой.

При больших линейных нагрузках под частью полюса, где потоки возбуждения и реакции якоря направлены навстречу друг другу, может произойти не только значительное изменение индукции, но и изменение направления поля — так называемое опрокидывание поля. На рис. 5.32 показано это состояние машины. Заштрихованная площадь треугольника BCD характеризует опрокидывание поля.

При опрокидывании поля в генераторном режиме происходит резкое падение напряжения, так как в части витков параллельной ветви машины ЭДС имеют разные знаки и вычитаются. В двигательном режиме опрокидывание поля приводит к уменьшению электромагнитного момента и останову двигателя. Как в генераторном, так и двигательном режиме опрокидывание поля является аварийным режимом, поскольку может сопровождаться нарушением коммутации и возникновением кру-

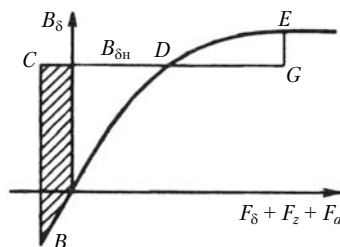


Рис. 5.32. Опрокидывание поля в воздушном зазоре

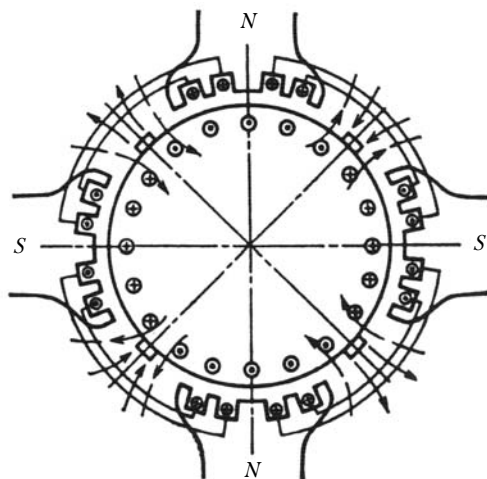


Рис. 5.33. Компенсация поперечной реакции якоря

гового огня на коллекторе — перекрытием электрической дугой коллектора и замыканием щеток.

Поперечную реакцию якоря можно скомпенсировать, применив компенсационную обмотку (см. рис. 5.12). Компенсационная обмотка расположена в пазах наконечников главных полюсов (рис. 5.33). Поле поперечной реакции якоря неподвижно относительно полюсов. Поэтому, располагая в пазах на статоре обмотку, МДС которой направлена встречно с МДС обмотки якоря, можно скомпенсировать поле реакции якоря.

Для компенсации поля поперечной реакции якоря в переходных и установившихся режимах компенсационная обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и МДС компенсационной обмотки примерно равна МДС поперечной реакции якоря, т.е. объемы меди компенсационной обмотки и обмотки якоря примерно одинаковы.

При проектировании в машинах постоянного тока до мощности $30 \div 60$ кВт поперечная реакция якоря компенсируется стабилизирующей обмоткой, а в машинах мощностью выше $50 \div 60$ кВт и в машинах с тяжелыми условиями коммутации выполняется компенсационная обмотка.

При сдвиге щеток с геометрической нейтрали в машинах постоянного тока появляется продольная реакция якоря. Если подключить щетки к источнику постоянного напряжения и поворачивать их относительно геометрической нейтрали,

МДС обмотки якоря будет складываться или вычитаться с МДС обмотки возбуждения (рис. 5.34).

При повороте щеток генератора в направлении вращения и щеток двигателя против направления вращения возникает размагничивающая продольная реакция якоря. При сдвиге щеток в обратном направлении возникает подмагничивающая продольная реакция якоря. Таким образом, в зависимости от направления сдвига щеток МДС продольной реакции якоря складывается с МДС обмотки возбуждения или вычитается из нее.

Сместить щетки с геометрической нейтрали можно на одну-две коллекторные пластины. При больших сдвигах ухудшается коммутация. При этих условиях продольную реакцию якоря можно определить из выражения

$$F_d = cA, \quad (5.41)$$

где $c \approx 0,4(\tau - b_\delta)$.

Нетрудно видеть, что $\tau - b_\delta$ — расстояние между главными полюсами. Результирующая реакция якоря

$$F_{р.я} = F_{qd} \pm F_d. \quad (5.42)$$

Обычно щетки устанавливаются так, чтобы продольная реакция якоря складывалась с МДС обмотки возбуждения. Сдвиг щеток в другую сторону приводит к ухудшению коммутации.

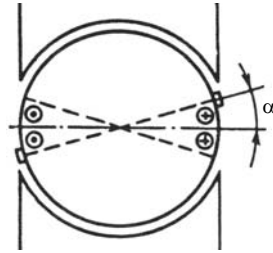


Рис. 5.34. К вопросу возникновения реакции якоря при сдвиге щеток с геометрической нейтрали

5.7. Коммутация

Процесс изменения направления тока в секциях при переходе их из одной параллельной ветви обмотки в другую называется коммутацией. Коммутационными процессами называются и процессы под щеткой. Коммутационные процессы определяют надежность работы машин постоянного тока, их габариты и возможность применения в тех или иных электроприводах.

Коммутация в машинах постоянного тока осуществляется коллектором — механическим преобразователем частоты (см. рис. 5.3). Коллектор или коммутатор может иметь

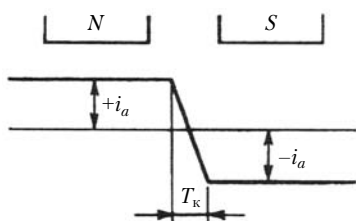


Рис. 5.35. Изменение тока в коммутируемой секции

и другие конструктивные исполнения. Например, коммутаторы выполняются на базе полупроводниковых элементов — транзисторов или тиристоров, известны коммутаторы, выполненные на базе магнитоуправляемых контактов — герконов. Однако механический преобразователь частоты остается одним из наилучших по своим массо-габаритным, энергетическим и другим показателям.

При коммутации ток в секции изменяет свое направление от $+i_a$ до $-i_a$, где i_a — ток в параллельной ветви обмотки якоря (рис. 5.35). При переходе секции из-под одного полюса под другой за время T_k — период коммутации происходит быстрое изменение тока. Период коммутации зависит от частоты вращения и числа коллекторных пластин. Обычно T_k составляет тысячные доли секунды. Секция, которая замыкается щеткой, называется коммутируемой секцией. Период коммутации T_k можно определить как время перемещения коллектора на ширину щетки:

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k}, \quad (5.43)$$

где $b_{щ}$ — ширина щетки; v_k — окружная скорость коллектора:

$$v_k = \pi D_k n = b_k K n, \quad (5.44)$$

здесь D_k — диаметр коллектора; b_k — ширина коллекторной пластины; K — число коллекторных пластин. Тогда

$$T_k = \frac{b_{щ}}{b_k K n} = \frac{\beta_k}{K n}, \quad (5.45)$$

здесь $\beta_k = \frac{b_{щ}}{b_k}$ — щеточное перекрытие для машин общепромышленного исполнения; $b_k = 2 \div 4$, а для машин со сложными обмотками $b_k = 6 \div 7$.

При $b_k = 2,5$, $n = 1500$ об/мин = 25 об/с и $K = 100$ в машине с простой петлевой обмоткой $T_k = 0,001$ с. Таким образом, частота периодических коммутационных процессов $f_k = \frac{1}{T_k}$ лежит в пределах 1000 ÷ 3000 Гц.

На рис 5.36 показан процесс перехода секции простой петлевой обмотки из одной параллельной ветви в другую. Ток нагрузки растекается по двум параллельным ветвям. При движении щеток относительно обмотки замыкается одна или две секции. Для упрощения рассмотрим коммутационные процессы, когда ширина щетки равна коллекторному делению. Ток коммутации i замыкается в коммутируемой секции, накладываясь на токи i_a в параллельных ветвях машины. При этом

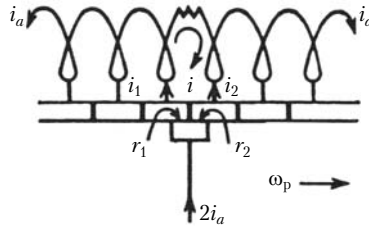


Рис. 5.36. Процесс перехода секции из одной параллельной ветви обмотки в другую

$$i_1 = i_a + i; \quad i_2 = i_a - i, \quad (5.46)$$

где i_1 и i_2 — токи, протекающие в щеточном контакте под набегающим и сбегающим краями щетки и в соответствующих коллекторных пластинах.

Сбегающий край щетки — тот край, который сходит с коллекторной пластины. Если на рис. 5.36 представить, что щетки двигаются, а обмотка неподвижна, сбегающий край будет справа, где сопротивление щеточного контакта r_2 , а набегающий край щетки — слева, где сопротивление r_1 . При неподвижной щетке обмотка якоря вращается в сторону, указанную стрелкой. Сопротивление короткозамкнутого контура определяется сопротивлением переходного контакта между щеткой и коллектором, а активными сопротивлениями секции, коллекторной пластины и щетки можно пренебречь.

Тогда для короткозамкнутого контура можно записать следующее уравнение Кирхгофа:

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 + i r_k = \sum e, \quad (5.47)$$

где r_k — сопротивление короткозамкнутого контура; $\sum e$ — сумма ЭДС, наводимых в коммутируемой секции.

Подставляя в уравнение (5.47) значения токов из выражений (5.46), получаем (пренебрегая r_k):

$$(i_a + i)r_1 - (i_a - i)r_2 = \sum e \quad (5.48)$$

или

$$\begin{aligned} i_a r_1 + i r_1 - i_a r_2 + i r_2 &= \sum e; \\ i(r_1 + r_2) - i_a(r_2 - r_1) &= \sum e, \end{aligned}$$

откуда

$$i = i_a \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} + \frac{\sum e}{r_1 + r_2} = i_{\text{п}} + i_{\text{д}}, \quad (5.49)$$

где $i_{\text{п}}$ — переходный ток; $i_{\text{д}}$ — добавочный ток. Если $\sum e = 0$, то $i_{\text{д}} = 0$ и

$$i = i_{\text{п}} = i_a \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2}. \quad (5.50)$$

Классическая теория коммутации предполагает, что сопротивление щеточного контакта равномерно по всей длине щетки и r_1 и r_2 пропорциональны площади щеток S_1 и S_2 под набегающим и сбегающим краями щетки. При этом предполагается, что токи под щеткой i_1 и i_2 распределены равномерно и пропорциональны площадям S_1 и S_2 .

При этих условиях, если считать за начало коммутации время $t = 0$, а за конец коммутации время $t = T_{\text{к}}$, площади щетки, контактирующие с соседними коллекторными пластинами, будут равны

$$S_1 = \frac{T_{\text{к}} - t}{T_{\text{к}}} S; \quad S_2 = \frac{t}{T_{\text{к}}} S, \quad (5.51)$$

где S — контактная площадь щетки, $S = S_1 + S_2$. Исходя из классической теории коммутации

$$r_1 + r_2 = r_{\text{щ}}, \quad (5.52)$$

где $r_{\text{щ}}$ — общее сопротивление щеточного контакта. Тогда

$$\begin{cases} r_1 = r_{\text{щ}} \frac{S}{S_1} = r_{\text{щ}} \frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}} - t}, \\ r_2 = r_{\text{щ}} \frac{S}{S_2} = r_{\text{щ}} \frac{T_{\text{к}}}{t}. \end{cases} \quad (5.53)$$

При этом переходный ток с учетом уравнений (5.53)

$$i = i_a \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} = i_a \frac{1 - \frac{t}{T_{\text{к}}}}{1 + \frac{t}{T_{\text{к}}}} = i_a \frac{T_{\text{к}} - 2t}{T_{\text{к}}} = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_{\text{к}}} \right). \quad (5.54)$$

При принятых выше допущениях ток i — линейная функция времени (рис. 5.37). Это и есть прямолинейная

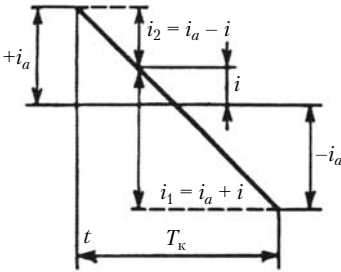


Рис. 5.37. Прямолинейная коммутация

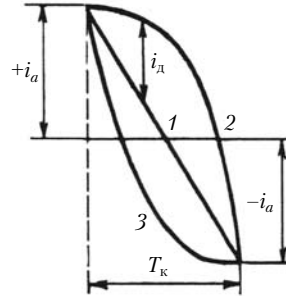


Рис. 5.38. Криволинейная коммутация

коммутация. Когда $\sum e \neq 0$, имеет место криволинейная коммутация, кривые 2 и 3 на рис. 5.38. Для сравнения на рис. 5.38 показана кривая 1 — прямолинейная коммутация. При прямолинейной коммутации ток под щеткой распределяется равномерно, а при криволинейной коммутации — неравномерно.

В коммутируемой секции ЭДС могут наводиться за счет изменения токов в самой секции e_L и соседних секциях e_M , а также за счет вращения секции во внешнем магнитном поле e_B

$$\sum e = e_L + e_M + e_B. \quad (5.55)$$

Сумма ЭДС самоиндукции и взаимной индукции называется реактивной ЭДС

$$e_p = e_L + e_M. \quad (5.56)$$

Электродвижущая сила e_L наводится за счет изменения тока в самой секции

$$e_L = -L_c \frac{di}{dt}, \quad (5.57)$$

где L_c — индуктивность секции. Среднее значение тока

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{\text{ср}} = -\frac{2i_\sigma}{T_k}. \quad (5.58)$$

Среднее значение ЭДС e_L

$$e_{L\text{ср}} = \frac{2L_c i_\sigma}{T_k}. \quad (5.59)$$

Электродвижущая сила взаимной индукции

$$e_M = \sum_1^n e_{M_n} = -\sum M_n \frac{di_n}{dt}, \quad (5.60)$$

где M_n — взаимная индуктивность между одновременно коммутируемыми секциями; i_n — ток в n -й коммутируемой секции.

Среднее значение ЭДС взаимной индукции

$$e_{Mcp} = \frac{2i_a}{T_k} \sum M_n. \quad (5.61)$$

Реактивная ЭДС стремится замедлить изменение тока в коммутируемой секции.

В зоне коммутации, где происходит изменение тока в секции, может быть внешнее магнитное поле. Причиной появления поля может быть поле поперечной реакции якоря или поле добавочных полюсов, которые специально устанавливаются в машине для улучшения коммутации.

Электродвижущая сила внешнего поля определяется по формуле, аналогичной (5.2):

$$e_B = 2B_k \omega_c l_\delta v_a, \quad (5.62)$$

где B_k — индукция в зоне коммутации.

В переходных процессах при изменении потока главных полюсов в коммутируемой секции наводится трансформаторная ЭДС

$$e_\tau = -w_c \frac{d\Phi_\delta}{dt}. \quad (5.63)$$

Реактивная ЭДС и ЭДС вращения могут складываться или вычитаться, при этом e_p может быть больше или меньше e_B . Это влияет на характер коммутации машины.

Если $e_p - e_B = 0$, т.е. ЭДС вращения компенсирует e_p , коммутация прямолинейная (прямая 1 на рис. 5.38). Если $e_p > e_B$, коммутация замедленная (кривая 2 на рис. 5.38). Если $e_B > e_p$, коммутация ускоренная (кривая 3 на рис. 5.38).

При замедленной коммутации ЭДС вращения не компенсирует e_p ($e_p > e_B$). Наихудший случай, когда ЭДС вращения и реактивная ЭДС складываются. Это имеет место, когда щетки установлены на геометрической нейтрали, добавочных полюсов нет, а поток поперечной реакции якоря наводит ЭДС одного знака с реактивной ЭДС.

При замедленной коммутации ток в коммутируемой секции не успел уменьшиться до нуля, а щетка уже сошла

с коллекторной пластины. Контур, где замыкается ток коммутации, разрывается, и на сбегающем крае щетки возникает искрение. При замедленной коммутации перегружается сбегающий край щетки.

При ускоренной коммутации ($e_B > e_p$) перегружен током набегающий край щетки. При большой перекомпенсации может искрить набегающий край щетки. Ускоренная коммутация может быть практически только в машинах, имеющих добавочные полюсы.

Выше достаточно упрощенно были рассмотрены основы теории коммутации. Примерно в таком виде классическая теория коммутации была разработана в трудах Е. Арнольда, Л. Дрейфуса, К. И. Шенфера и других ученых еще в начале XIX в.

Для развития теории коммутации и практического использования много сделали советские ученые В. С. Кулебакин, М. П. Костенко, В. Т. Касьянов, М. Ф. Карасев, О. Б. Брон, О. Г. Вегнер и др. [3].

В последние годы теория коммутации развивалась, уточнялась, создавались программы для расчета коммутации на ЭВМ, но в методическом отношении классическая теория коммутации остается лучшей для понимания процессов коммутации.

5.8. Способы улучшения коммутации

Классическая теория коммутации предполагает равномерное распределение сопротивления щеточного контакта по всей длине щетки. Но исследования процессов коммутации дали противоположную картину — токи под щеткой распределяются резко неравномерно. Из-за неравномерности механического контакта соприкосновение щетки с коллекторной пластиной происходит в отдельных точках. Плотность тока и температура в этих точках значительны. В этих точках создается ионная проводимость, что и обеспечивает благоприятные условия для контакта щетки с коллектором.

Количество и местоположение точечных контактов непрерывно изменяются, так как щетка перекрывает коллекторную пластину в тысячные доли секунды и состояние контакта за это время изменяется. В этих условиях возникновение контактов по всей длине щетки равновероятно и принятое в классической теории равномерное распределение тока под щеткой остается справедливым, если счи-

тать, что контакт между щеткой и коллектором осуществляется за счет ионной проводимости.

На коммутацию в первую очередь влияют состояние поверхности коллектора и щеток и правильный выбор материала коллекторных пластин и щеток. Коллекторные пластины выполняются из меди, а в машинах, работающих при тяжелых условиях коммутации, — из меди с присадкой кадмия. Щетки изготавливаются путем прессования из угольных и графитных порошков. Щетки делятся на четыре группы: угольно-графитные, графитные, электрографитные и металлографитные. Наибольшее применение находят электрографитные щетки марок ЭГ4, ЭГ8, ЭГ14, ЭГ61, ЭГ74, которые допускают плотность тока под щеткой до 150 А/см^2 и линейную скорость 60 м/с . Эти щетки применяют для двигателей и генераторов со средними и затрудненными условиями коммутации.

При правильном выборе марки щеток и правильной эксплуатации машины постоянного тока в результате электролиза на коллекторе образуется политура, состоящая из пленки оксидов меди. Наличие политуры на коллекторе является свидетельством хорошей коммутации машины.

На коммутацию значительное влияние оказывают механические причины — биение коллектора, плохая обработка, выступание слюды, вибрации щеток и щеткодержателей. Механические причины особенно сильно влияют на коммутацию быстроходных машин.

Условия эксплуатации машины постоянного тока — загрязнение коллектора, влажность, атмосферное давление, наличие в окружающем воздухе химических веществ — также значительно влияют на коммутацию.

Коммутация ухудшается при уменьшении атмосферного давления. На самолетах применяются специальные высотные щетки. При работе щеток в керосине в погружных машинах постоянного тока обеспечивается удовлетворительная коммутация. Однако коммутация в других жидкостях и газах требует тщательных исследований.

Одной из причин плохой коммутации — возникновения искрения на коллекторе — является потенциальное искрение, которое связано с возникновением больших напряжений между коллекторными пластинами.

При расчете машин постоянного тока число коллекторных пластин выбирают из условия, чтобы среднее напряжение между коллекторными пластинами не превышало $15\text{--}20 \text{ В}$.

При холостом ходе напряжение между пластинами коллектора определяется выражением

$$U_k = 2B_\delta w_c l_\delta v_a. \quad (5.64)$$

При нагрузке поперечная реакция якоря искажает поле в воздушном зазоре (см. рис. 5.29) и напряжение на коллекторе распределяется неравномерно (рис. 5.39). Потенциальные характеристики на коллекторе снимаются с помощью вольтметра, когда один измерительный конец вольтметра присоединен к щетке, а второй — скользит по коллектору. На рис. 5.39 штриховая кривая показывает распределение напряжения при холостом ходе, а сплошная — при нагрузке. При этом $\Delta U' > \Delta U$.

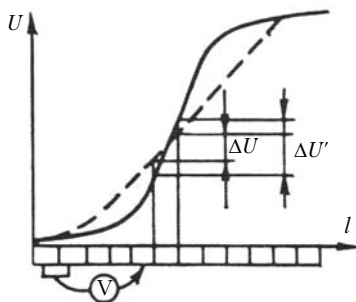


Рис. 5.39. Потенциальная диаграмма коллектора

Из-за больших значений $\text{grad } U$ может быть пробой изоляционных промежутков между отдельными пластинами, что, в свою очередь, может повлечь пробой других пластин и появление кругового огня на коллекторе, когда дуга возникнет между щетками. Круговой огонь обычно приводит к оплавлению коллектора и выходу из строя машины.

Распределение поля в воздушном зазоре влияет на коммутацию. Опрокидывание поля из-за реакции якоря может привести к расстройству коммутации.

Компенсационная обмотка компенсирует поле поперечной реакции якоря, устраняет искажение поля в воздушном зазоре и сохраняет распределение напряжения на коллекторе таким же, что и при холостом ходе.

Как было показано в параграфе 5.7, ток в коммутируемой секции определяется выражением (5.49). Если $i_d = 0$, коммутация прямолинейная и в момент схода щетки с коллекторной пластины ток коммутации равен нулю. Чтобы коммутация была без искрения — удовлетворительная коммутация, надо стремиться снизить добавочный ток:

$$i_d = \frac{\sum e}{\sum r}, \quad (5.65)$$

где $\sum e$ — сумма ЭДС в коммутируемой секции; $\sum r$ — сумма сопротивления контура коммутируемой секции.

Чтобы снизить i_d , надо уменьшить Σe либо увеличить Σr . Улучшение коммутации практически достигается путем правильного подбора щеток. Для улучшения коммутации желательно выбирать щетки с высоким активным сопротивлением, но увеличение сопротивления щеток приводит к увеличению потерь и нагреву щеток, что может ухудшить коммутацию. При расчете коммутации необходимо правильно удовлетворить противоречивые требования.

При проектировании щетки подбирают согласно ГОСТ 52157—2003, в котором указаны преимущественные применения той или иной марки щеток, переходное падение напряжения, плотность тока под щеткой, допустимая скорость и давление пружины на щетку. С учетом накопленного опыта эксплуатации щеток и правильного расчета машины можно обеспечить удовлетворительную коммутацию для большинства тяжелых условий применения машин постоянного тока.

Для увеличения сопротивления коммутируемого контура иногда применяют слоенные щетки, разделенные на несколько слоев тонкими прокладками (рис. 5.40). Включение резисторов или

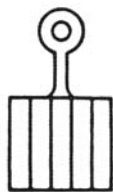


Рис. 5.40.
Слоенная щетка

вентилей в коммутируемую секцию приводит к улучшению коммутации, но из-за усложнения изготовления машины и увеличения потерь они применяются редко.

Уменьшение Σe достигается несколькими путями. В основном это обеспечивается снижением реактивной ЭДС e_p и введением ЭДС, компенсирующей реактивную ЭДС. Реактивная ЭДС (5.56)—(5.59) снижается за счет правильного выбора числа витков в секции и конфигурации паза. Для уменьшения e_p надо стремиться к минимальному числу витков в секции и к большему раскрытию паза, по возможности применяя открытые пазы, так как при этом уменьшается индуктивность секции L_c . При правильном выборе геометрии паза в машинах с полузакрытым пазом можно снизить e_p и не применять добавочные полюсы.

При проектировании реактивная ЭДС рассчитывается по формуле

$$e_p = 2w_c l_\delta A v_a \lambda_n \cdot 10^{-6}, \quad (5.66)$$

где w_c — число витков в секции; l_δ — длина якоря, м; A — линейная нагрузка, А/м; v_a — окружная скорость, м/с; λ_n — удельная магнитная проводимость пазового рассеяния.

Для улучшения коммутации надо снижать линейную нагрузку и индуктивность коммутируемой секции.

Значение реактивной ЭДС является косвенной оценкой коммутации машины. Максимальная реактивная ЭДС для машин небольшой мощности допускается до 2,5–3 В. В крупных машинах с компенсационной обмоткой максимальная реактивная ЭДС может достигать 12 В.

Чтобы снизить e_p , можно увеличить T_k не за счет ширины щетки, а за счет увеличения числа щеток и смещения их на щеточных пальцах так, чтобы они перекрывали такую же поверхность, что и щетки большей ширины.

Важное значение имеют ток в параллельной ветви машины, который для обеспечения удовлетворительной коммутации выбирается в пределах 250–350 А, число коллекторных пластин и линейная скорость на коллекторе, которая зависит от диаметра коллектора и частоты вращения. Главным средством улучшения коммутации машин постоянного тока является применение дополнительных или добавочных полюсов, которые в зоне коммутации создают внешнее поле, компенсирующее реактивную ЭДС.

Добавочные полюсы устанавливаются в зоне коммутации между главными полюсами. Обмотки добавочных полюсов соединяются последовательно с обмоткой якоря, поэтому МДС обмоток добавочных полюсов следит за изменением тока в якоре в установившихся и переходных процессах.

Чтобы скомпенсировать e_p , необходимо в зоне коммутации скомпенсировать поле реакции якоря и создать поле, при вращении в котором в коммутируемой секции наведется ЭДС вращения, равная и противоположно направленная e_p (тогда $e_B + e_p = 0$), или получить e_B , несколько большую e_p . При этих условиях в машине будет прямолинейная или ускоренная коммутация.

Электродвижущая сила вращения определяется из формулы (5.62): $B_k \sim I_a$. Тогда $e_B \sim I_a v_a$. Индукция под добавочными полюсами меньше, чем под главными, и равна 0,5–0,25 Тл. Благодаря тому что B_k небольшая, магнитная цепь добавочных полюсов не насыщена, что обеспечивает линейную зависимость между e_B и током нагрузки. Следует иметь в виду, что и e_p линейно зависит от тока нагрузки. Поэтому обеспечивается компенсация e_p во всех режимах работы машины постоянного тока.

Добавочные полюсы должны иметь определенный порядок следования по отношению к главным полюсам. На

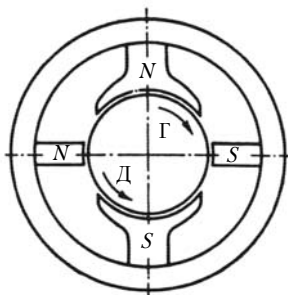


Рис. 5.41. Расположение главных и добавочных полюсов

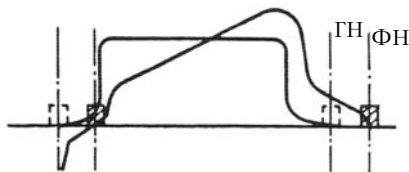


Рис. 5.42. Смещение щеток с геометрической нейтрали:

ГН — геометрическая нейтраль;
ФН — физическая нейтраль

рис. 5.41 показано расположение главных и добавочных полюсов в генераторном Г и двигательном Д режимах.

Все машины постоянного тока мощностью выше 1 кВт для обеспечения удовлетворительной коммутации выпускаются с добавочными полюсами.

В машинах небольшой мощности скомпенсировать реактивную ЭДС можно путем смещения щеток с геометрической нейтрали. Поперечная реакция якоря искажает поле в машине (рис. 5.42), и в зоне коммутации на геометрической нейтрали появляется поле. Если щетки оставить на геометрической нейтрали, то ЭДС вращения, наводимая от этого поля, будет совпадать с e_p и в машине будет замедленная коммутация с неблагоприятными условиями, когда в коммутируемой секции реактивная ЭДС и ЭДС вращения складываются.

Для того чтобы e_p и e_B вычитались, надо щетки сдвинуть за физическую нейтраль, где поле меняет свой знак. В генераторном режиме щетки смещаются на одну-две коллекторные пластины по направлению вращения, а в двигательном режиме — против направления вращения. Этот способ улучшения коммутации имеет недостаток, связанный с тем, что e_p компенсируется в одном режиме. Автоматической настройки при изменении нагрузки, которая есть в машинах с добавочными полюсами, при сдвиге щеток с нейтрали нет.

Рассмотренные основные способы улучшения коммутации не исчерпывают возможностей влияния на сложные быстротекающие процессы коммутации.

По ГОСТу 183—74 коммутация по степени искрения делится на пять классов: 1 — отсутствие искрения (темная

коммутация); $1\frac{1}{4}$ — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки; $1\frac{1}{2}$ — слабое искрение под большей частью щетки; 2 — искрение под всем краем щетки; 3 — значительное искрение под всем краем щетки с крупными и вылетающими искрами. Степень искрения определяется визуально.

Степень искрения 3 приводит к значительному почернению коллектора, не устранимому протиранием поверхности коллектора бензином. Такое искрение приводит к подгару и разрушению щеток. Работа машины при степени искрения 3 недопустима.

Степень искрения 2 допускается только при кратковременных режимах работы и при перегрузках. При таком искрении появляются следы почернения на коллекторе, не устранимые протиранием бензином.

При степени искрения $1\frac{1}{2}$ появляются следы почернения на коллекторе, которые легко устраняются путем протирания поверхности коллектора бензином.

При степени искрения 1 и $1\frac{1}{4}$ длительная работа машины не приводит к почернению коллектора и появлению нагара на щетках. При настройке коммутации при длительном режиме работы машины необходимо обеспечить эти две степени искрения.

Обеспечить удовлетворительную коммутацию в процессе проектирования машины не всегда удастся, поэтому после изготовления опытных образцов проводится экспериментальная настройка коммутации. Основной метод настройки коммутации — метод подпитки добавочных полюсов и снятия потенциальных кривых под щетками.

Подпитка добавочных полюсов осуществляется по схеме рис. 5.43. На рисунке Я1 — якорь машины, в которой осуществляется настройка коммутации, ДП — добавочные полюсы, Я2 — якорь вспомогательного генератора, обеспечивающего

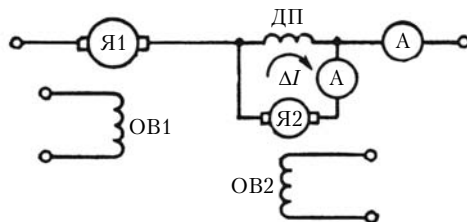


Рис. 5.43. Настройка коммутации по схеме подпитки добавочных полюсов

подпитку добавочных полюсов, ОВ1 — обмотка возбуждения исследуемой машины, ОВ2 — обмотка возбуждения вспомогательного генератора.

При подпитке через обмотку добавочных полюсов проходит дополнительный ток подпитки ΔI , который вычитается из тока якоря $I_{\text{я}}$ или складывается с ним. Изменяя ток подпитки ΔI , добиваются при разных нагрузках степени искрения 1 или $1\frac{1}{4}$.

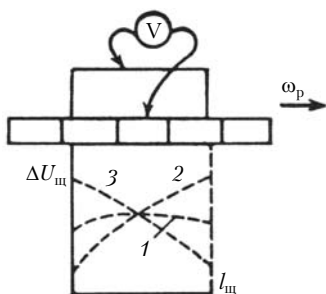
Кривые, характеризующие степень подпитки, позволяют установить необходимую степень усиления или ослабления действия добавочных полюсов. Действие добавочных полюсов можно регулировать путем изменения числа витков или воздушного зазора, размеры которого можно изменять при помощи ферромагнитных прокладок, вставляемых между станиной и добавочным полюсом.

Последний способ применяется чаще, так как обычно число витков добавочных полюсов небольшое и изменение их числа дает резкое изменение МДС обмотки добавочных полюсов.

Кривые, характеризующие степень подпитки, снимаются после устранения механических причин искрения, при хорошей приработке щеток в течение нескольких часов работы под нагрузкой.

При снятии потенциальных кривых под щеткой измеряется падение напряжения $\Delta U_{\text{щ}}$ между щеткой и коллектором (рис. 5.44). При этом один конец вольтметра передвигается по коллектору работающей при нагрузке машины.

Вид потенциальных кривых позволяет судить о характере коммутации при движении коллектора в направлении, указанном стрелкой на рис. 5.44. Кривая 1 свидетельствует



о прямолинейной коммутации, кривая 2 — о замедленной (перегружен сбегаящий край щетки), кривая 3 — об ускоренной коммутации (перегружен набегающий край щетки). Определив характер коммутации по потенциальным кривым щеток, можно провести настройку коммутации, меняя МДС дополнительных полюсов.

Рис. 5.44. Снятие потенциальных кривых под щеткой

При настройке коммутации следует стремиться к несколь-

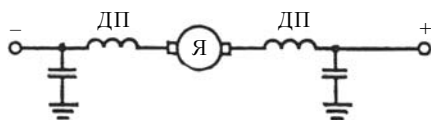


Рис. 5.45. Включение фильтров на выходе машины для устранения радиопомех

ко ускоренной коммутации, так как при вращении коллектора возникают механические усилия, приподнимающие сбегаящий край щетки и прижимающие набегающий. Поэтому целесообразно немного разгрузить сбегаящий край щетки и уйти от прямолинейной коммутации.

Коммутация создает электромагнитные колебания высокой частоты (1–3 кГц), в результате чего возникают радиопомехи. Для устранения радиопомех, особенно при плохой коммутации, в цепь якоря машины постоянного тока включаются фильтры (рис. 5.45). При этом используются индуктивности машины, а конденсаторы помещаются в коробке выводов.

Геометрия машины постоянного тока, надежность и области применения во многом определяются коммутацией. Поэтому развитие теории коммутации, совершенствование коллекторного узла имеют важное значение для расширения области применения машин постоянного тока.

5.9. Генераторы постоянного тока

Генераторы постоянного тока преобразуют механическую энергию, подводимую к валу машины, в электрическую энергию постоянного тока.

По способу возбуждения генераторы постоянного тока делятся на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

Генераторы независимого возбуждения могут возбуждаться от постороннего источника постоянного тока или от постоянных магнитов. Генераторы с постоянными магнитами относятся к магнитоэлектрическим генераторам, а генераторы с возбуждением от источника постоянного тока называются генераторами с электромагнитным возбуждением.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от схемы включения обмотки возбуждения делятся на генераторы параллельного (шунтового), последовательного (серийного) и смешанного (компаундного) возбуждения (рис. 5.46).

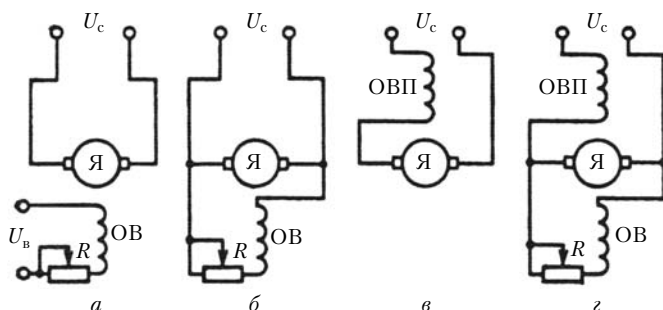


Рис. 5.46. Схемы возбуждения генераторов:

a — независимое; *б* — параллельное; *в* — последовательное; *г* — смешанное

Обмотки независимого и параллельного возбуждения ОВ (рис. 5.46, *a* и *б*) выполняются из тонких проводов и имеют большое число витков, а обмотка последовательного возбуждения ОВП на рис. 5.46, *в* имеет несколько витков, но в ней проходит ток якоря и она выполняется из витков большого сечения. Для регулирования тока возбуждения в цепи обмоток независимого и параллельного возбуждения включается регулировочный резистор R (рис. 5.46, *a*, *б*, *г*). Мощность возбуждения в генераторах постоянного тока составляет $5 \div 10\%$ мощности машины. В генераторах параллельного возбуждения ток возбуждения равен $1 \div 5\%$.

На рис. 5.47 дана энергетическая диаграмма генератора постоянного тока с независимым возбуждением. Механическая мощность, подводимая к валу генератора, преобразуется в электрическую мощность P_2 . При этом

$$P_1 - \sum P = P_2, \quad (5.67)$$

где сумма потерь $\sum P$:

$$\sum P = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{э}} + P_{\text{д}}, \quad (5.68)$$

здесь $P_{\text{мех}}$ — механические потери; $P_{\text{ст}}$ — потери в стали; $P_{\text{э}}$ — электрические потери в обмотке якоря; $P_{\text{д}}$ — добавочные потери.

Потери на возбуждение $P_{\text{в}}$ относятся к источнику, питающему обмотку возбуждения.

Электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ — мощность в воздушном зазоре:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{мех}} - P_{\text{ст}} - P_{\text{д}}. \quad (5.69)$$

Механические потери в машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, включают в себя потери на трение в подшипниках, потери трения якоря о воздух и вентиляционные потери. Кроме того, в машинах постоянного тока есть потери трения на коллекторе. В зависимости от нажатия пружины щеткодержателя на щетку эти потери могут составлять 25÷35% всех механических потерь.

Основные магнитные потери в машинах постоянного тока — в стали якоря. При вращении магнитопровода происходит перемагничивание стали и в зубцах, и ярме якоря, так же как и в машинах переменного тока, есть потери на вихревые токи и гистерезис. Потери в стали рассчитываются по тем же формулам, что и для машин переменного тока ((1.143) и (3.69)). Из-за наличия пазов и зубцов на якоре машины на поверхности полюсных наконечников имеют место пульсационные потери, которые могут составлять 5÷10% основных магнитных потерь. При наличии пазов на полюсных наконечниках, когда машина имеет компенсационную обмотку, пульсационные потери есть и на поверхности якоря.

К добавочным потерям относятся потери в бандажах, которые крепят обмотку якоря и обмоткодержатели, а также потери, связанные с коммутацией и искажением поля при нагрузке. Обычно добавочные потери принимают равными 0,5% отдаваемой мощности генератора при наличии компенсационной обмотки и 1% — в машинах без компенсационной обмотки.

Электрические потери в машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, составляют примерно 50% всех потерь в машине. К ним относятся электрические потери в обмотке якоря, компенсационной обмотке, обмотке добавочных полюсов и последовательной обмотке, а также электрические потери под щеткой:

$$P_{\text{э,щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}, \quad (5.70)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ — переходное падение напряжения в щеточном контакте.

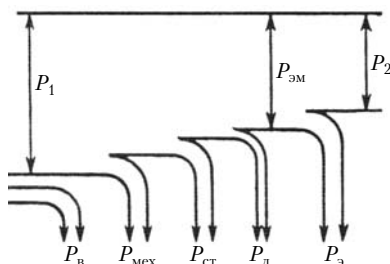


Рис. 5.47. Энергетическая диаграмма генератора

Падение напряжения $\Delta U_{\text{щ}}$ зависит от марки щетки и приводится в ГОСТ на пару щеток при рекомендуемой плотности тока. Для угольных и графитных щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 3$ В, для металлоугольных щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 0,5$ В.

Потери в меди обмоток подсчитываются по уравнению (1.140). Потери в обмотках можно определить, зная плотность тока J и массу обмотки (без изоляции) G :

$$P_{\text{э}} = I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \frac{\rho l}{S} = \left(\frac{I_{\text{я}}}{S} \right)^2 \frac{\rho l S \gamma}{\gamma} = \frac{\rho}{\gamma} J^2 G. \quad (5.71)$$

Коэффициент полезного действия генераторов постоянного тока

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}, \quad (5.72)$$

и зависимость $\eta = f(P_2)$ имеет такой же вид, как и у других машин (см. рис. 1.87). Максимум КПД наступает при равенстве суммы $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$ электрическим потерям $P_{\text{э}}$. Для генераторов независимого возбуждения $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$ можно считать постоянными потерями, а $P_{\text{э}}$ — переменными. У генератора постоянного тока мощностью 10 кВт $\eta = 83 \div 87\%$, а мощностью 1000 кВт $\eta = 92 \div 96\%$.

Характеристики холостого хода генераторов постоянного тока всех систем возбуждения снимают при постоянной частоте вращения и независимом возбуждении, когда обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока, позволяющему изменять ток от нуля до $I_{\text{в. ном}}$. Харак-

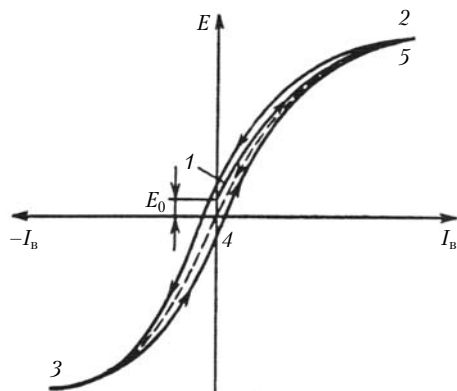


Рис. 5.48. Характеристики холостого хода

теристика холостого хода машины постоянного тока представлена на рис. 5.48. Характеристику холостого хода начинают снимать от точки 1. Когда $I_{\text{в}}$ равен нулю, на якоре есть остаточное напряжение E_0 . Затем снимают восходящую ветвь 1, 2, далее — нисходящую ветвь 2, 3 и снова уменьшают $I_{\text{в}}$ и снимают ветвь 3, 4, 5.

В точке 4 ток возбуждения, так же как и в точке 2, реверсируется. Ветвь, показанная на рис. 5.48 штриховой линией, называется основной характеристикой холостого хода. Особенностью характеристики холостого хода машины постоянного тока, так же как и синхронной машины, является наличие остаточной ЭДС и относительно широкой петли гистерезиса.

Перед снятием характеристики холостого хода необходимо убедиться, что щетки стоят на геометрической нейтрали. Для этого к выводам обмотки якоря, когда якорь не вращается, подключается вольтметр постоянного тока с нулем посередине шкалы, а ток в обмотке возбуждения включается и выключается. Бросок напряжения при щетках, установленных на геометрической нейтрали, равен нулю или минимален. Обычно щетки на геометрической нейтрали устанавливаются на заводе. На щеточной траверсе и щите имеются риски, фиксирующие положение нейтрали.

Внешняя характеристика генератора $U = f(I_{\text{я}})$ при $n = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = \text{const}$ показывает зависимость напряжения на выходе генератора от тока нагрузки. На рис. 5.49 дана внешняя характеристика генератора независимого возбуждения. При $I_{\text{я}} = 0$ (холостой ход) — на выводах генератора ЭДС холостого хода E . С ростом нагрузки напряжение падает сначала по линейному закону, в основном за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины, а затем в области нагрузок, близких к номинальной, по нелинейному закону — за счет большего размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

При нагрузках, равных примерно половине номинальной, реакция якоря влияет слабо на поле машины и внешняя характеристика линейна. При больших нагрузках поперечная реакция якоря ослабляет поле машины и напряжение изменяется как за счет реакции якоря, так и за счет падения на внутреннем сопротивлении. На рис. 5.49 отрезок ab характеризует падение напряжения за счет внутреннего сопротивления (линейная зависимость от $I_{\text{я}}$), а отрезок $бв$ — за счет реакции якоря (нелинейная зависимость от $I_{\text{я}}$). Па-

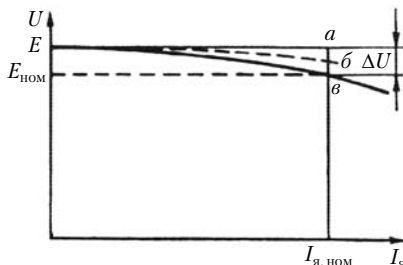


Рис. 5.49. Внешняя характеристика

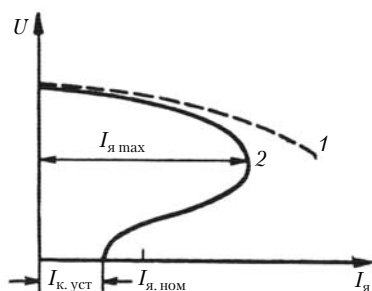


Рис. 5.50. Внешние характеристики генераторов с независимым (1) и параллельным возбуждением (2)

так как напряжение на обмотке возбуждения генератора с параллельным возбуждением при росте нагрузки падает и ток возбуждения уменьшается. Внешние характеристики снимаются при неизменном сопротивлении регулировочного резистора, включенного в цепь обмотки возбуждения. Вид внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением (кривая 2) при перегрузках отличается от вида внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (кривая 1). При перегрузках поле генератора с параллельным возбуждением опрокидывается и установившийся ток при коротком замыкании $I_{\text{к. уст}}$ определяется остаточным магнитным потоком. Несмотря на то что $I_{\text{к. уст}}$ может быть меньше $I_{\text{я. ном}}$, короткие замыкания генераторов параллельного возбуждения опасны из-за того, что переходный ток короткого замыкания $I_{\text{я. max}}$ значителен. При токах $I_{\text{я. max}}$, значительно превышающих $I_{\text{я. ном}}$, может возникнуть круговой огонь на коллекторе.

На рис. 5.51 представлены внешние характеристики генераторов постоянного тока при различных схемах возбуждения.

Внешняя характеристика генератора последова-

ние напряжения ΔU определяет жесткость внешней характеристики. Чем меньше ΔU , выраженное в процентах от номинального напряжения, тем выше жесткость внешней характеристики.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения идет ниже внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (кривая 1),

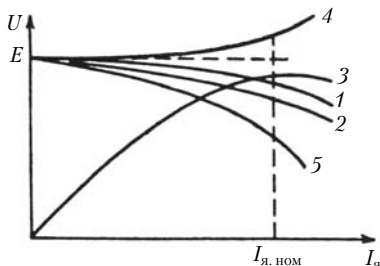


Рис. 5.51. Внешние характеристики генераторов при различных схемах возбуждения:

1 — независимое; 2 — параллельное; 3 — последовательное; 4 — смешанное при согласном включении; 5 — смешанное при встречном включении

тельного возбуждения (кривая 3) имеет вначале линейный участок, а при токах, близких к номинальному, наступает насыщение и рост напряжения замедляется. Генераторы последовательного возбуждения применяются редко. В генераторах смешанного возбуждения обмотки последовательного и параллельного возбуждения (см. рис. 5.46) могут быть включены согласно, когда их МДС совпадают, и встречно, когда МДС последовательной обмотки вычитается из МДС обмотки параллельного возбуждения. При согласном включении обмоток возбуждения напряжение растет с ростом нагрузки (кривая 4). При встречном включении обмоток внешняя характеристика мягкая (кривая 5).

Вид внешних характеристик при смешанном возбуждении зависит от соотношения МДС последовательной и параллельной обмоток. При согласном включении последовательная обмотка может быть рассчитана так, что ее МДС при номинальной нагрузке скомпенсирует падение напряжения за счет реакции якоря и падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины (рис. 5.52) или создаст в воздушном зазоре поток, который при нагрузке обеспечит рост напряжения (кривая 4 на рис. 5.51). Чтобы получить внешнюю характеристику с $\Delta U = 0$ при $I_{я, ном}$, необходимо несколько уменьшить МДС по сравнению с МДС, при которой определена кривая 4 на рис. 5.51. Получить жесткую внешнюю характеристику без регулятора в цепи обмотки возбуждения, чтобы $\Delta U = 0$ на всем диапазоне изменения $I_{я}$, не удастся, так как продольная составляющая поперечной реакции якоря F_{qd} изменяется по нелинейному закону, а МДС последовательной обмотки $F_c = I_{я} w_c$ — по линейному закону.

Встречное включение обмоток параллельного и последовательного возбуждения применяется для получения специальных характеристик. Так называемая экскаваторная характеристика обеспечивает ограничение тока якоря и, следовательно, и момента при перегрузках (рис. 5.53). Такая внешняя характеристика необходима также в сварочных генераторах.

Регулировочные характеристики $I_b = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$ показывают, как надо изменять ток возбуждения при

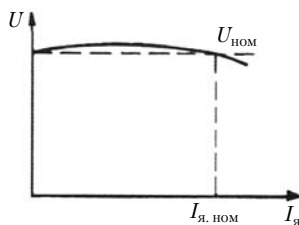


Рис. 5.52. Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения при $E = U_{ном}$

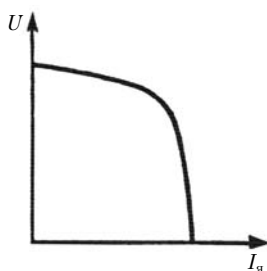


Рис. 5.53. Внешняя характеристика при встречном включении последовательной обмотки возбуждения

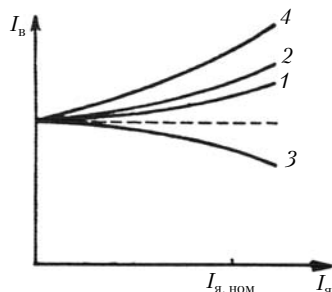


Рис. 5.54. Регулировочные характеристики при различных схемах возбуждения:

1 — независимое; 2 — параллельное; 3 — смешанное при согласном включении обмоток; 4 — смешанное при встречном включении

изменении нагрузки, чтобы напряжение оставалось постоянным. На рис. 5.54 даны регулировочные характеристики для генераторов с различными системами возбуждения. Для генераторов последовательного возбуждения регулировочная характеристика не снимается.

Характеристики короткого замыкания $I_я = f(I_в)$ при $U = 0$ и $n = \text{const}$ снимают при замкнутой накоротко обмотке якоря (рис. 5.55). Характеристика короткого замыкания линейная, так как машина не насыщена. Ток короткого замыкания не должен превышать $(1,2 \div 1,25)I_{я. \text{ ном}}$. При снятии характеристики короткого замыкания должны быть предусмотрены меры, обеспечивающие разрыв цепи якоря при увеличении тока больше допустимых значений. Остаточное поле определяет ток короткого замыкания при $I_в = 0$. Чтобы начальное значение тока короткого замыкания не было слишком большим, перед снятием характеристики машину размагничивают. Для этого обмотку возбуждения на небольшое время подключают к переменному напряжению. В машинах с высоким уровнем электромагнитных нагрузок из-за значительного влияния токов в коммутлируемых секциях снять эту характеристику не удастся.

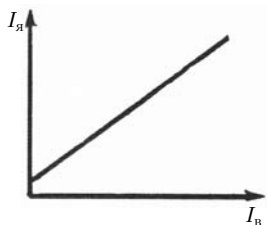


Рис. 5.55. Характеристика короткого замыкания генератора

Нагрузочная характеристика $U_я = f(I_в)$ при $I_я = \text{const}$ и $n = \text{const}$ (кри-

вая 2) и характеристика холостого хода (кривая 1), показанные на рис. 5.56, позволяют определить катеты прямоугольного треугольника abc , который называют реактивным треугольником. При снятии нагрузочной характеристики при изменении тока возбуждения ток в якоре поддерживается неизменным путем изменения нагрузочного сопротивления в цепи якоря.

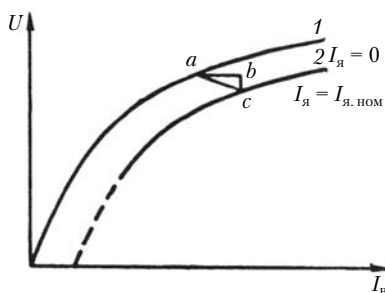


Рис. 5.56. Нагрузочная характеристика

В реактивном треугольнике катет bc — падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины $I_{я} R_{вн}$, а катет ab характеризует падение напряжения за счет размагничивающего действия продольной составляющей поперечной реакции якоря.

Основными характеристиками генераторов постоянного тока являются характеристики холостого хода, внешняя и регулировочная. Характеристики короткого замыкания и нагрузочная — вспомогательные характеристики.

При сдвиге щеток с геометрической нейтрали продольная реакция якоря в зависимости от направления сдвига щеток создает поле по продольной оси машины, которое действует встречно или согласно с полем, создаваемым параллельной обмоткой возбуждения. За счет сдвига щеток с геометрической нейтрали машина возбуждается со стороны якоря, и тогда последовательная обмотка на статоре не нужна. Однако смещение щеток с геометрической нейтрали приводит к ухудшению коммутации и снижению использования меди якоря.

Как и машины переменного тока, генераторы постоянного тока могут работать параллельно друг с другом. Обычно на параллельную работу включаются два и редко несколько генераторов постоянного тока. Так как к сетям постоянного тока бесконечной мощности можно отнести лишь транспортные сети, необходимо анализировать влияние генераторов друг на друга.

Для параллельной работы используются генераторы независимого, параллельного и смешанного возбуждения. Как правило, на параллельную работу включаются генераторы,

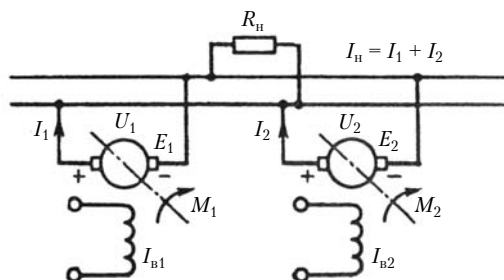


Рис. 5.57. Схема параллельной работы генераторов независимого возбуждения

близкие друг другу по мощности с одной и той же системой возбуждения.

На рис. 5.57 показана схема параллельной работы генераторов независимого возбуждения. При включении генераторов на параллельную работу полярность напряжений должна быть одинаковой и $U_1 \approx U_2$. Чем меньше $\Delta U = U_1 - U_2$, тем меньше бросок тока при включении генератора на общие шины.

При параллельной работе генераторов напряжения на генераторах и на шинах нагрузки одинаковы и равны U . Для двух генераторов, включенных на параллельную работу,

$$U = E_1 - I_1 R_{\text{вн}1} = E_2 - I_2 R_{\text{вн}2}, \quad (5.73)$$

где $R_{\text{вн}1}$ и $R_{\text{вн}2}$ соответственно внутренние сопротивления первого и второго генераторов.

Электродвижущие силы первого и второго генераторов:

$$E_1 = c_{e1} \Phi_1 n_1; \quad (5.74)$$

$$E_2 = c_{e2} \Phi_2 n_2. \quad (5.75)$$

Чтобы изменить нагрузку на одном из генераторов, надо изменить E_1 или E_2 . Как следует из формул (5.74) и (5.75), ЭДС можно изменять путем изменения потока и частоты вращения.

Частота вращения первого генератора увеличится, если увеличить момент M_1 , приложенный к первому генератору. При увеличении M_1 увеличивается E_1 и ток первого генератора I_1 растет. Чтобы изменить момент на валу генератора, надо регулировать активную мощность, подводимую к паровой турбине, дизелю или другому двигателю, приводящему в движение генератор.

При изменении тока возбуждения изменяется поток и ЭДС. Поэтому при увеличении тока возбуждения первого

генератора растет E_1 и ток нагрузки первого генератора, при этом должен увеличиваться M_1 , если I_2 не уменьшается.

При анализе параллельной работы следует не забывать, что мощность, отдаваемая в сеть постоянного тока, равна мощности приводных двигателей за вычетом потерь в генераторах. Поэтому при неизменной нагрузке на шинах постоянного тока увеличение нагрузки на первом генераторе приводит к разгрузке второго генератора, и наоборот.

На параллельную работу могут включаться генераторы с различным числом полюсов и частотой вращения, так как из выражения (5.73) следует, что при параллельной работе должны быть равными ЭДС.

При параллельной работе желательно иметь одинаковые внешние характеристики генераторов. При отличающихся друг от друга внешних характеристиках нагрузки распределяются неравномерно, так как ток нагрузки I_n равен сумме токов в первом и втором генераторах (рис. 5.58). Перегружается генератор, имеющий более жесткую внешнюю характеристику. Чтобы выровнять в этом случае нагрузки, надо увеличить ток возбуждения в первом генераторе. При включении на параллельную работу генераторов различной мощности необходимо, чтобы внешние характеристики, построенные в относительных единицах, по возможности приближались друг к другу.

Параллельная работа генераторов параллельного возбуждения ничем не отличается от рассмотренной выше параллельной работы генераторов независимого возбуждения.

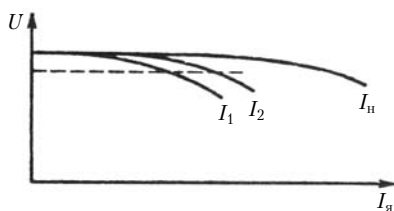


Рис. 5.58. Распределение нагрузок в генераторах при параллельной работе

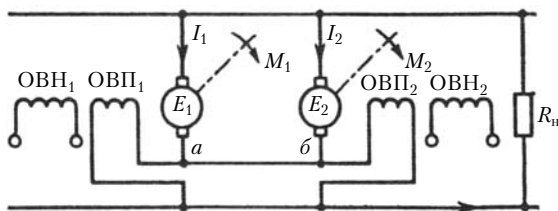


Рис. 5.59. Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения с уравнительным проводом

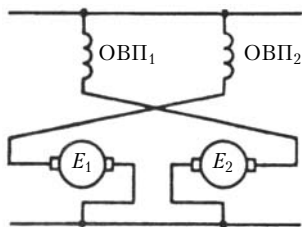


Рис. 5.60. Параллельная работа генераторов смешанного возбуждения при перекрестном включении обмоток возбуждения

Генераторы смешанного возбуждения включаются на параллельную работу по схеме рис. 5.59. Без уравнительного провода *аб* параллельная работа генераторов смешанного возбуждения невозможна, так как при случайном увеличении тока в якоре первого генератора I_1 будет увеличиваться поток в этом генераторе из-за увеличения тока в последовательной обмотке ОВП₁. Это приведет к дальнейшему увеличению тока в этом генераторе и разгрузке, уменьшению тока второго генератора. После того, как

из-за перегрузки частота вращения первого генератора начнет падать и поток и ЭДС на первом генераторе E_1 станут меньше потока и ЭДС второго генератора E_2 , нагрузку примет на себя второй генератор и ток I_2 увеличится. Возникнут качания в системе, исключающие возможность параллельной работы. Уравнительный провод, соединяющий однополярные точки, выравнивает ЭДС на генераторах, что обеспечивает устойчивую работу двух генераторов на общие шины.

При параллельной работе генераторов смешанного возбуждения иногда применяется схема с перекрестным соединением последовательных обмоток возбуждения (рис. 5.60). Такое включение обмоток последовательного возбуждения обеспечивает устойчивую параллельную работу генераторов.

5.10. Двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока преобразуют электрическую энергию постоянного тока в механическую.

Несмотря на успехи в создании статических полупроводниковых преобразователей и внедрение регулируемых электроприводов переменного тока, производство двигателей постоянного тока в процентном отношении к производству двигателей переменного тока не сокращается, и они находят новые области применения.

Двигатели постоянного тока благодаря наличию механического преобразователя частоты — коллектора допускают плавное и экономичное регулирование частоты вращения. Это преимущество перед двигателями переменного тока обес-

печивает возможность применения двигателей постоянного тока в электроприводах с широким диапазоном изменения частоты вращения. Двигатели постоянного тока находят применение в приводах прокатных станов, станков, на транспорте и в других системах автоматизированного электропривода.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока, так же как и генераторы, делятся на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (см. рис. 5.46). Двигатели независимого возбуждения могут быть разделены на двигатели с электромагнитным возбуждением, когда обмотка возбуждения подключена к постороннему источнику постоянного тока или на зажимы двигателя, и на двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением, когда вместо обмотки возбуждения используются постоянные магниты.

На рис. 5.61 представлена энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения. Электрическая мощность P_1 , забираемая из сети, расходуется на покрытие потерь $\sum P$ и преобразуется в механическую мощность P_2 :

$$P_1 = \sum P + P_2. \quad (5.76)$$

Потери — это мощность, которая в машине преобразуется в тепло. Сумма потерь

$$\sum P = P_{\text{в}} + P_{\text{э}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{д}}, \quad (5.77)$$

где $P_{\text{в}}$ — электрические потери в обмотке возбуждения; $P_{\text{э}}$ — электрические потери в обмотке якоря; $P_{\text{ст}}$ — магнитные потери — потери в стали магнитопровода якоря; $P_{\text{мех}}$ — механические потери; $P_{\text{д}}$ — добавочные потери.

Электромагнитная мощность или мощность воздушного зазора $P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{в}} - P_{\text{э}}$ преобразуется в полезную механическую мощность и расходуется на покрытие потерь $P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{д}}$.

Расчет потерь производится по тем же формулам, что и для генератора.

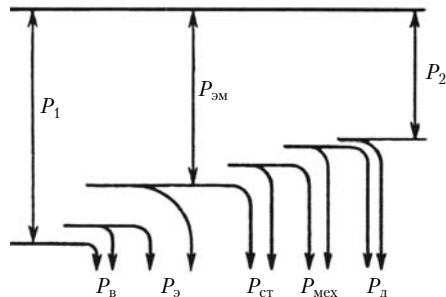


Рис. 5.61. Энергетическая диаграмма двигателя

Электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_p}. \quad (5.78)$$

Электромагнитный момент уравнивает момент на валу машины и момент, связанный с потерями $P_{\text{ст}}$, $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{д}}$.
Для двигательного режима $U > E$ и

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{вн}}, \quad (5.79)$$

откуда

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{вн}}}. \quad (5.80)$$

Так как из формулы (5.15) $E = c\Phi\omega$, тогда из формулы (5.79) частота вращения

$$\omega = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{вн}}}{c\Phi}. \quad (5.81)$$

Частота вращения пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна потоку.

Если из (5.8) определить

$$I_{\text{я}} = \frac{M}{c\Phi}, \quad (5.82)$$

то, подставляя выражение (5.82) в формулу (5.81), получаем

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{\text{вн}} M}{c\Phi^2}. \quad (5.83)$$

Это выражение описывает механическую характеристику двигателя $\omega = f(M)$ при $U = \text{const}$.

Основными характеристиками двигателей постоянного тока являются рабочие и механические характеристики. Характеристики холостого хода и короткого замыкания снимаются так же, как и в генераторном режиме.

Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения представлены на рис. 5.62. Это — зависимости M , P_1 , ω , $I_{\text{я}}$ и $\eta = f(P_2)$ при постоянном напряжении сети U и неизменном положении реостата в цепи обмотки возбуждения.

С увеличением нагрузки на валу двигателя P_2 растет момент на валу двигателя M , а частота вращения немного падает. Увеличение нагрузки приводит к росту мощности P_1 , забираемой из сети, и росту тока якоря $I_{\text{я}}$. Зависимость КПД от нагрузки имеет такой же вид, как и для других электрических машин.

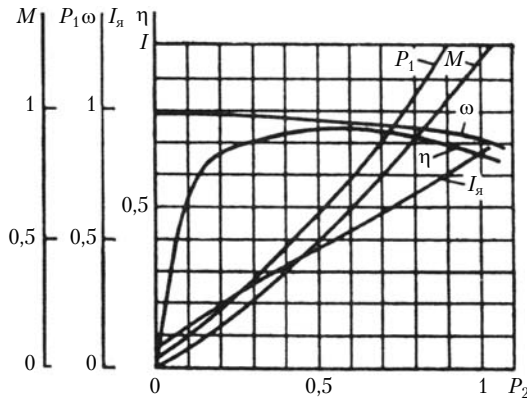


Рис. 5.62. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения

Зависимости P_1 , $I_{я}$, $\eta = f(P_2)$ мало изменяются для двигателей с различными схемами возбуждения. Отличаются только характеристики $\omega = f(P_2)$.

Характеристика $\omega = f(M)$ при постоянном напряжении сети и неизменных сопротивлениях регулировочных реостатов называется механической характеристикой двигателя. На рис. 5.63 представлены механические характеристики двигателей постоянного тока при различных схемах возбуждения.

Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения — жесткая. Двигатель последовательного возбуждения имеет удобную для транспортных установок механическую характеристику, когда с уменьшением частоты вращения растет момент. Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения — промежуточная между механическими характеристиками двигателя параллельного и последовательного возбуждения.

В двигателях последовательного возбуждения ток возбуждения равен току якоря, поэтому из формулы (5.82)

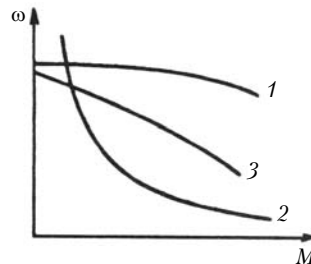


Рис. 5.63. Механические характеристики двигателей при различных схемах возбуждения:

1 — параллельное; 2 — последовательное; 3 — смешанное при согласном включении обмоток

$$M = ck_{\Phi}I_{\text{я}}^2, \quad (5.84)$$

так как $\Phi = k_{\Phi}I_{\text{я}}$.

В двигателях параллельного возбуждения момент пропорционален потоку, а в двигателях последовательного возбуждения — квадрату тока, поэтому двигатели последовательного возбуждения имеют большой пусковой момент и большую перегрузочную способность.

Двигатели последовательного возбуждения из-за особенностей своей механической характеристики не могут применяться в электроприводах, в которых возможно уменьшение момента сопротивления до нуля, что приведет к уменьшению тока в якоре и снижению потока, и двигатель пойдет в разнос. При этом увеличится частота вращения и машина может выйти из строя.

Устойчивая работа двигателя с нагрузкой зависит от вида механической характеристики двигателя и нагрузки (рис. 5.64). Критерий устойчивой работы двигателя

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_c}{dn}. \quad (5.85)$$

При выборе двигателя для той или иной нагрузки следует помнить о критерии устойчивости.

Частоту вращения двигателей постоянного тока исходя из формулы (5.81) можно регулировать путем изменения напряжения, введения сопротивления в цепь ротора и изменения потока. Наиболее распространенный способ регулирования частоты вращения — изменение потока возбуждения путем регулирования тока в обмотке возбуждения. Наиболее простой способ регулирования тока возбуждения — варьирование сопротивления регулировочного резистора в контуре возбуждения (см. рис. 5.46, а, б).

При изменении тока возбуждения согласно формуле (5.83) имеют место механические характеристики такие, как это по-

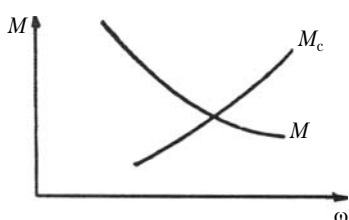


Рис. 5.64. К устойчивости работы двигателя

казано на рис. 5.65. Таким способом можно регулировать частоту вращения в пределах 1:1,5, 1:2. Глубокое уменьшение потока недопустимо, поскольку при нагрузке реакция якоря будет «опрокидывать» поле возбуждения, что приведет к неустойчивой работе двигателя. Увеличе-

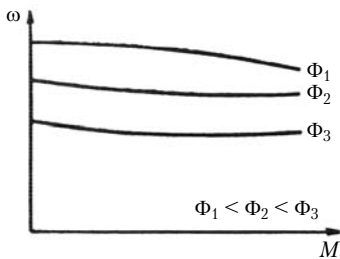


Рис. 5.65. Регулирование частоты вращения путем изменения потока возбуждения

ные пределы регулирования частоты вращения, он является экономичным и находит широкое применение, когда пределы изменения частоты вращения небольшие.

Регулирование частоты вращения путем введения $R_{\text{рег}}$ позволяет изменять частоту вращения в широких пределах, но этот способ неэкономичен, поскольку регулировочный резистор включается в силовую цепь и на нем выделяется тепло, пропорциональное квадрату тока нагрузки.

Механические характеристики при этом способе регулирования показаны на рис. 5.66. Механические характеристики при различных $R_{\text{рег}}$ выходят из одной точки, так как при холостом ходе ($I_{\text{я}} \approx 0$) $R_{\text{рег}}$ практически не влияет на падение напряжения. При регулировании частоты вращения путем изменения тока возбуждения механические характеристики сходятся вблизи точки $I_{\text{я}} = I_{\text{я.к}}$, где $I_{\text{я.к}}$ — установившийся ток короткого замыкания. Он определяется внутренним сопротивлением двигателя и напряжением, которое равно напряжению сети.

Регулирование частоты вращения путем введения сопротивления в цепь якоря применяется в двигателях последовательного и смешанного возбуждения. В двигателях последовательного возбуждения для регулирования частоты вращения применяется также шунтирование обмотки возбуждения активным сопротивлением. При тех же пре-

ние потока в обычных двигателях параллельного возбуждения нецелесообразно, так как магнитная система двигателей насыщена. При увеличении массы двигателя и принятии специальных мер можно увеличить пределы регулирования частоты вращения в ненасыщенных двигателях до 1:5. Хотя этот способ обеспечивает сравнительно небольшие

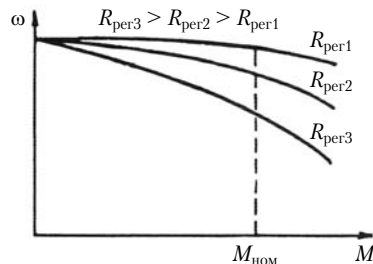


Рис. 5.66. Регулирование частоты вращения путем изменения сопротивления в цепи якоря

делах регулирования частоты вращения последовательное включение $R_{\text{рег}}$ в цепь якоря и шунтирование обмотки возбуждения дают одни и те же технико-экономические показатели.

Лучшие механические характеристики и меньшие потери в двигателе постоянного тока достигаются при регулировании частоты вращения за счет подводимого к двигателю напряжения. Но, как и в машинах переменного тока, при этом способе регулирования частоты вращения необходимо иметь громоздкое устройство, обеспечивающее регулирование напряжения. Обычно это электромашинное устройство. При наличии сети переменного тока это устройство состоит из двух электрических машин: асинхронного или синхронного двигателя и генератора постоянного тока. В автономных системах вместо приводного электродвигателя, вращающего генератор постоянного тока, применяются дизели, двигатели внутреннего сгорания и паровые или газовые турбины.

Способ регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока путем изменения подводимого к якорю напряжения обеспечивает широкие пределы регулирования. Этот способ по существу сходен с частотным регулированием в машинах переменного тока, так как закон изменения напряжения и частоты близок к $U/f = \text{const}$ и регулирование происходит при постоянном потоке. Механический преобразователь частоты — коллектор изменяет частоту переменного тока, протекающего в якоре, пропорционально напряжению, приложенному к обмотке якоря. Классической схемой регулирования частоты вращения за счет приложенного к якорю напряжения является схема генератор — двигатель (рис. 5.67). В этой схеме якорь генератора не-

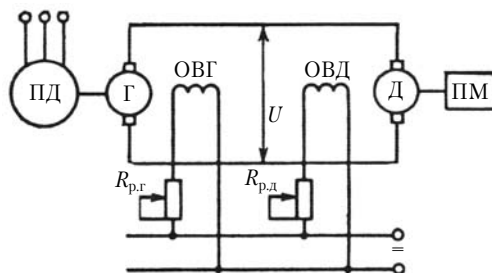


Рис. 5.67. Система генератор — двигатель:

ПД — приводной двигатель; ОВГ — обмотка возбуждения генератора;
 $R_{\text{п,г}}$ $R_{\text{п,д}}$ — резисторы в цепи обмотки генератора и двигателя

зависимого возбуждения питает двигатель. Напряжение на генераторе Г и двигателе Д изменяется за счет изменения тока в обмотке возбуждения генератора ОВГ. Генератор вращается приводным двигателем, который может быть асинхронным двигателем при наличии сети переменного тока или двигателем постоянного тока. Частота вращения генератора постоянная.

Частота вращения двигателя и приводного механизма ПМ регулируется как за счет напряжения, так и за счет регулирования тока в обмотке возбуждения двигателя ОВД. При изменении напряжения в схеме генератор — двигатель механические характеристики изменяются так, как это показано на рис. 5.68.

Схема генератор — двигатель позволяет изменять частоту вращения двигателя в пределах 1:25, 1:100 и выше. При этом осуществляется экономичное регулирование, но требуется три электрические машины. Эта схема позволяет осуществлять реверс путем изменения направления тока в обмотке возбуждения генератора.

На рис. 5.69 показано изменение момента, тока в якоре и частоты вращения от напряжения. Достоинство системы генератор — двигатель также в том, что регулирование частоты вращения происходит при неизменном токе в якоре.

В связи с успехами полупроводниковой техники схема Г — Д вытесняется тиристорными электроприводами, в которых приводной двигатель и генератор заменяются силовым полупроводниковым преобразователем. Несмотря на замену двух машин силовым преобразователем на транзисторах или тиристорах, схема Г — Д будет применяться в реверсив-

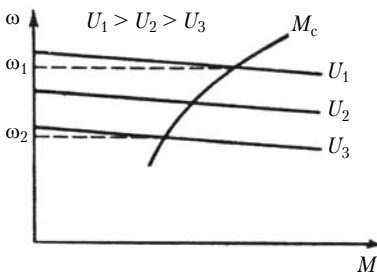


Рис. 5.68. Регулирование частоты вращения в системе генератор — двигатель

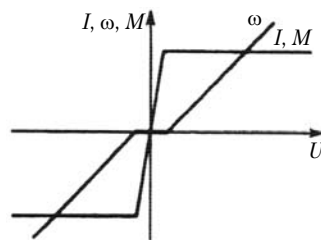


Рис. 5.69. Изменение момента, тока в якоре и частоты вращения при реверсе в системе генератор — двигатель

ных приводах, так как имеет высокую перегрузочную способность и не ухудшает качество электроэнергии в сетях.

В последние годы внедряется частотное регулирование машин переменного тока. Однако появление новых схем с полупроводниковыми преобразователями частоты не вытесняет двигатели постоянного тока, которые по-прежнему находят широкое применение в электроприводах. Двигатели постоянного тока изготавливаются мощностью от нескольких ватт до 10 000 кВт, причем верхний предел частоты вращения ограничивается коммутацией, а нижний — устойчивостью в работе.

5.11. Переходные процессы в машинах постоянного тока

Динамику машин постоянного тока можно исследовать по дифференциальным уравнениям (5.1)–(5.4). Для решения этих нелинейных уравнений необходимо применять ЭВМ. В настоящее время такие процессы, как пуск, самовозбуждение генераторов с параллельным возбуждением и другие, изучены достаточно подробно.

Пуск двигателей постоянного тока может осуществляться тремя способами: прямым включением в сеть, с помощью пускового резистора и при пониженном напряжении цепи якоря. При пуске необходимо обеспечить достаточный для быстрого разбега пусковой момент при токах, не опасных для двигателя.

Прямой пуск двигателей постоянного тока допускается для двигателей небольшой мощности, так как в первый момент при пуске, когда $n = 0$, в якоре машины протекают большие токи. При $n = 0$ и $E = 0$ ток в обмотке якоря из формулы (5.80):

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{вн}}}. \quad (5.86)$$

Внутреннее сопротивление небольшое, и ток при пуске может достигать $(50 \div 100)I_{\text{я. ном}}$. Такие токи могут ухудшить коммутацию, что может привести к перекрытию дугой коллектора. Прямым пуском обычно пускаются машины мощностью до сотен ватт, у которых внутреннее сопротивление большое и пусковой ток не превышает $(5 \div 10)I_{\text{я. ном}}$, а пуск протекает 1–2 с.

Пуск с помощью включения пускового резистора в цепь якоря является наиболее распространенным. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 5.70.

Двигатель подключается к сети через пусковой реостат, который имеет три вывода. Зажим Л присоединяется к сети, Ш — к обмотке возбуждения, Я — к якору.

В первый момент пуска подвижной контакт присоединяется к контакту 1 и все сопротивление вводится в цепь якоря, а обмотка возбуждения соединяется напрямую с сетью. Когда $n = 0$, ток в якоре

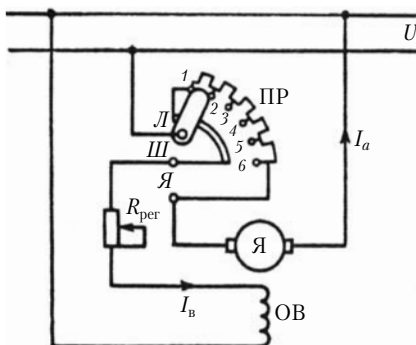


Рис. 5.70. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{вн}} + R_{\text{п}}}, \quad (5.87)$$

где $R_{\text{п}}$ — сопротивление пускового реостата.

Значение $R_{\text{п}}$ подбирается так, чтобы в начальный момент ток в якоре не превышал $(1,4 \div 2,5)I_{\text{я.ном}}$. Большие значения тока $I_{\text{я.ном}}$ относятся к машинам небольшой мощности.

По мере разгона двигателя пусковой реостат постепенно выводится и по окончании разбега двигателя он находится в положении 6 и якорь подключается напрямую в сеть. Длительное протекание тока по пусковому реостату недопустимо, так как он рассчитан на кратковременный режим работы.

При отключении двигателя от сети обмотка возбуждения замыкается через цепь якоря и тем самым исключаются перенапряжения на обмотке возбуждения и возникновения дуги на контактах.

Промышленность выпускает станции управления, обеспечивающие автоматический пуск двигателей постоянного тока.

При пуске активное сопротивление пускового реостата изменяется ступенями и ток в якоре пульсирует. Пульсации тока вызывают пульсации электромагнитного момента, который равен произведению потока возбуждения и тока в якоре. Пульсации тока и момента вызывают пульсации частоты вращения (рис. 5.71). Установившийся режим наступает, когда $M_{\text{эм}} = M_{\text{с}}$. В переходном режиме

$$M_{\text{эм}} = J \frac{d\omega_{\text{р}}}{dt} + M_{\text{с}}.$$

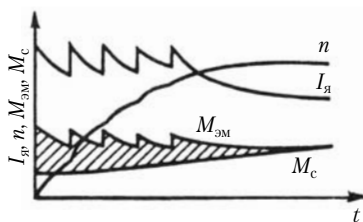


Рис. 5.71. Зависимости ω , $I_{\text{я}}$, $M_{\text{эм}} = f(t)$ при пуске

вочного резистора $R_{\text{рег}} = 0$. Двигатель последовательного возбуждения обладает большим пусковым моментом, так как поток возбуждения определяется током якоря.

При пуске и в установившемся режиме недопустимо отключение обмотки возбуждения от сети. Отключение — обрыв обмотки возбуждения — приводит к уменьшению потока возбуждения — уменьшению ЭДС и возрастанию тока в якоре. Увеличение тока в якоре приводит к возрастанию электромагнитного момента и частоты вращения. Говорят, что машина в этих условиях идет в разнос. Возрастание тока якоря и частоты вращения приводит к ухудшению коммутации и может кончиться аварией.

Пуск двигателей постоянного тока при благоприятном протекании переходных процессов осуществляется при питании двигателя от источника постоянного тока с регулируемым напряжением. Примером применения такой схемы пуска является система генератор — двигатель. Однако эта система имеет высокую стоимость и применяется для пуска и регулирования частоты вращения машин постоянного тока большой мощности.

Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения относится к переходным режимам, имеющим много общего с самовозбуждением асинхронного генератора (см. параграф 3.18). Для самовозбуждения необходим остаточный поток, который может составлять $1 \div 5\%$ номинального потока возбуждения. Небольшая ЭДС от этого потока вызывает в якоре и обмотке возбуждения ток, который приводит к увеличению потока возбуждения, что приводит к новому увеличению потока возбуждения и т.д. Нарастание потока возбуждения продолжается до тех пор, пока напряжение не достигает установившегося значения.

На рис. 5.72 упрощенно показан процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения. В переходном

При разгоне двигателя в обмотке якоря наводится ЭДС $E = c\Phi\omega$. Электродвижущая сила уравнивает приложенное напряжение, уменьшая ток в якоре, поэтому при пуске следует стремиться к тому, чтобы поток был максимален, т.е. сопротивление регулиро-

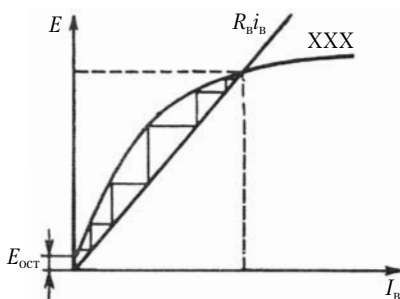


Рис. 5.72. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения:

XXX — характеристики холостого хода;
 $R_B i_B$ — вольт-амперная характеристика обмотки возбуждения

режиме уравнение контура возбуждения

$$u_B = R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \quad (5.88)$$

где L_B — индуктивность обмотки возбуждения (индуктивностью обмотки якоря можно пренебречь).

В установившемся режиме ток в контуре возбуждения определяется только активным сопротивлением. Производная $\frac{di_B}{dt}$ определяет скорость

нарастания тока в обмотке возбуждения. Точка пересечения характеристики холостого хода и вольт-амперной характеристики определяет решение двух уравнений, которые заданы графически на рис. 5.72.

Самовозбуждения не будет, если характеристика холостого хода и вольт-амперная характеристика не пересекаются. Это возможно при слишком большом значении R_B и недостаточной частоте вращения, когда мала ЭДС (рис. 5.73). Самовозбуждения не будет, когда ЭДС от остаточного поля $E_{ост}$ и ток в обмотке возбуждения от этой ЭДС действуют встречно.

Следует отметить, что насыщение магнитной системы машины определяет установившийся режим работы машины с самовозбуждением. В ненасыщенной машине процесс самовозбуждения не устанавливается, так как характеристики холостого хода и вольт-амперная характеристика не пересекаются.

При уменьшении R_B наклон прямой $R_B i_B$ уменьшается и она может касаться XXX. Дальнейшее уменьшение R_B приведет к самовозбуждению машины (см. рис. 5.72). Активное сопротивление обмотки возбуждения, при котором еще возможно самовозбуждение, когда вольт-амперная характери-

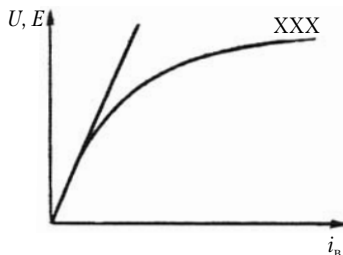


Рис. 5.73. Условие возбуждения генератора

ка касательна к характеристике холостого хода, называется критическим сопротивлением. Когда изменяется частота вращения генератора, говорят о критической частоте вращения, при которой характеристики холостого хода касаются вольт-амперной характеристики обмотки возбуждения.

Из сказанного выше следует, что напряжение на выводах генератора можно регулировать как путем изменения сопротивления в контуре возбуждения, так и путем изменения насыщения и частоты вращения.

Отключение двигателя от сети производится выключателем. За счет накопленной кинетической энергии выбег двигателя вместе с приводным механизмом может продолжаться некоторое время. Время выбега уменьшается, если обмотка возбуждения не отключается от сети. Тогда за счет потерь в стали двигатель останавливается быстрее.

Во многих случаях торможение следует осуществлять быстро, а иногда и точно (станки, лифты, транспорт). Возможны три основных типа быстрого останова двигателей постоянного тока: динамическое торможение, торможение противовотоком и рекуперативное торможение.

При динамическом торможении якорь переключают на резистор R (рис. 5.74). Обмотка возбуждения ОВ остается подключенной к сети. Торможение в этом случае осуществляется быстрее, так как к потерям в стали в магнитопроводе добавляются электрические потери в обмотке якоря и добавочном резисторе.

Торможение противовотоком осуществляется путем изменения направления тока в якоре за счет переключения выводов якоря к сети (рис. 5.75). Эта схема применяется для быстрого останова двигателя, который проходит в трудных условиях ухудшения коммутации, быстрого выделения большого количества тепла. Для ограничения тока в якоре применяется добавочное сопротивление R_d .

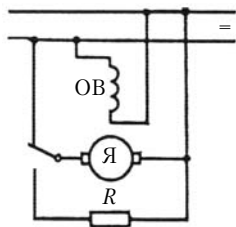


Рис. 5.74. Схема динамического торможения

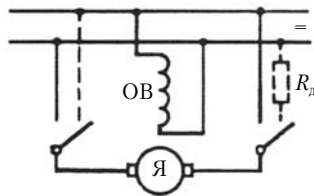


Рис. 5.75. Схема торможения противовотоком

При рекуперативном торможении двигатель переводится в генераторный режим, а затем отключается от сети. Достоинство этого способа в том, что при рекуперативном торможении часть кинетической энергии отдается в сеть, а при других способах торможения кинетическая энергия преобразуется в тепло.

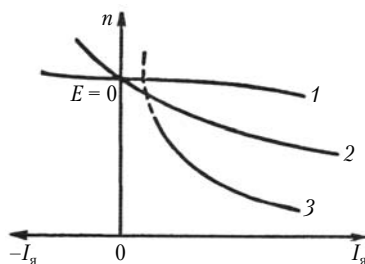


Рис. 5.76. Рекуперативное торможение

Для того чтобы двигатель перевести в генераторный режим, надо повысить ЭДС. Когда E будет больше U , ток в якоре изменит направление и двигатель перейдет в генераторный режим (рис. 5.76). При рекуперативном торможении увеличивается поток возбуждения и ЭДС возрастает. Пока $E > U$, в сеть будет отдаваться электрическая энергия. В генераторном режиме машина будет работать до определенной частоты вращения, так как увеличивать поток возбуждения можно в ограниченных пределах. Насыщение магнитопровода не позволит значительно увеличить поток возбуждения.

Рекуперативное торможение широко применяется на транспорте. Рекуперация может осуществляться двигателями параллельного и смешанного возбуждения (кривые 1 и 2 на рис. 5.76). Двигатели последовательного возбуждения не позволяют осуществлять рекуперацию энергии (кривая 3 на рис. 5.76).

Характер переходных процессов при включении на параллельную работу зависит от разности напряжений сети постоянного напряжения и подключаемой к сети машины. Когда напряжения сети и машины равны друг другу, броски тока минимальны.

При переходных процессах в машинах постоянного тока переходные токи влияют в первую очередь на коммутацию. Ухудшение коммутации ограничивает броски токов и определяет характер протекания переходных процессов и конструкцию машины постоянного тока.

5.12. Специальные машины постоянного тока

Электромашинный усилитель поперечного поля (амплидин). В генераторах независимого возбуждения мощность возбуждения P_v составляет $1 \div 5\%$ мощности генератора P_2 . Коэффициент усиления

$$k_y = \frac{P_2}{P_B} = 20 \div 100. \quad (5.89)$$

В системах автоматического управления желательно иметь больший коэффициент усиления, чтобы уменьшить массу промежуточных блоков усиления. Электромашинные усилители — это генераторы постоянного тока с коэффициентом усиления 10^3 — 10^4 .

Электромашинный усилитель (ЭМУ) поперечного поля имеет на якоре две пары щеток, причем щетки по поперечной оси машины qq замкнуты накоротко (рис. 5.77). Небольшой ток I_1 в обмотке управления OU создает небольшой поток управления Φ_1 по продольной оси dd машины. Поток управления наводит в короткозамкнутом контуре по поперечной оси машины ток I_2 , который создает по поперечной оси машины поток Φ_2 , который неподвижен относительно щеток, а в витках обмотки якоря, вращающихся в поперечном поле, наводится ЭДС E_3 . Эта ЭДС на щетках в продольной оси создает выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Ток нагрузки I_3 создает поток реакции якоря Φ_3 , который направлен навстречу потоку Φ_1 . Чтобы скомпенсировать действие потока нагрузки на поток управления, в ЭМУ поперечного поля устанавливается компенсационная обмотка КО. Для точной компенсации в ЭМУ поперечного поля имеется регулировочный резистор $R_{\text{рег}}$, с помощью которого производится настройка компенсации.

В витках обмотки якоря складываются токи в короткозамкнутом контуре I_2 и ток нагрузки I_3 . В каждой четверти об-

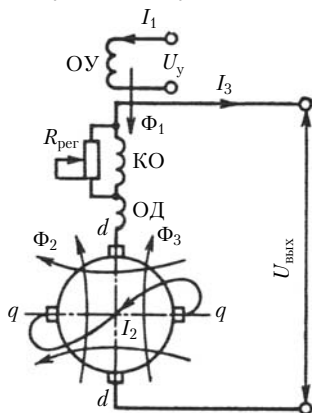


Рис. 5.77. Схема ЭМУ поперечного поля

мотки якоря токи отличаются друг от друга, что вносит лишь некоторые особенности в расчет электрических потерь в обмотке якоря.

Обмотка дополнительных полюсов ОД обтекается током I_3 .

На рис. 5.78 показано также направление потоков в ЭМУ поперечного поля. Штриховой линией показаны потоки реакции якоря Φ_3 от тока нагрузки и поток компенсационной обмотки Φ_K . Результирующий поток в продольной оси машины равен потоку обмотки управле-

ния Φ_1 , так как МДС компенсационной обмотки и поперечной реакции от тока нагрузки в сумме равны нулю.

На рис. 5.79 представлен поперечный разрез магнитопровода якоря и статора ЭМУ поперечного поля. Сталь якоря имеет обычную конфигурацию. Статор — неявнополюсный с пазами, имеющими разный профиль. Обмотка дополнительных полюсов, которой снабжается ЭМУ для улучшения коммутации тока нагрузки, располагается на зубце по продольной оси машины 1. Компенсационная обмотка 2, которая состоит из катушек разной ширины, помещается в пазах между осью d и большим пазом. В большом пазу располагаются обмотки управления 3, которых обычно в ЭМУ бывает две или четыре, и одна сторона катушки компенсационной обмотки. Высота спинки магнитопровода над большим пазом всего несколько миллиметров, так как над большим пазом замыкается только поток управления.

В ЭМУ поперечного поля объединены два генератора независимого возбуждения. Первый каскад — обмотка управления и поперечный короткозамкнутый контур. Второй каскад — поперечный короткозамкнутый контур с током возбуждения I_2 и выход — продольный ток I_3 и напряжение $U_{\text{вых}}$. Таким образом коэффициент усиления по мощности ЭМУ поперечного поля равен

$$k_y = k_{y1}k_{y2}, \quad (5.90)$$

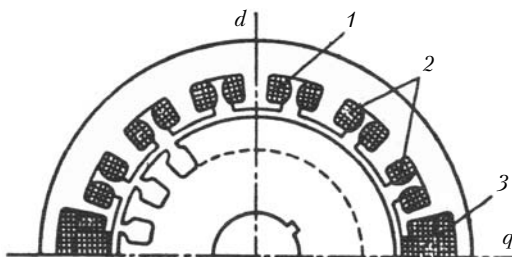


Рис. 5.79. Конструкция ЭМУ поперечного поля

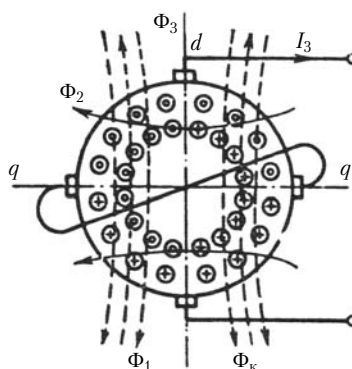


Рис. 5.78. Наложение токов и потоков в ЭМУ поперечного поля

где k_{y1} и k_{y2} — коэффициенты усиления по мощности первого и второго каскадов.

Обычно ЭМУ поперечного поля выполняются в одном агрегате с приводным двигателем. Выпускаются ЭМУ на мощность от сотен ватт до десятков киловатт.

Электромашинный усилитель продольного поля. В свое время были предложены десятки конструкций ЭМУ. Наиболее интересной схемой для понимания работы генераторов является схема ЭМУ продольного поля (рототрола). Это генератор параллельного возбуждения, имеющий сопротивление обмотки возбуждения несколько больше критического.

На рис. 5.80, *a* дана схема ЭМУ продольного поля. Магнитодвижущие силы обмотки управления ОУ и обмотки самовозбуждения ОСВ действуют согласно. Коэффициент усиления ЭМУ продольного поля зависит от того, насколько сопротивление контура обмотки самовозбуждения приближается к критическому сопротивлению, т.е. зависит от соотношения $F_{o,y}$ и $F_{o,cb}$ (рис. 5.80, *б*).

В ЭМУ продольного поля коэффициент усиления может достигать 10^2 — 10^3 . Выполняя схему ЭМУ продольного поля двухступенчатой, можно получить $k_y \approx 10^3 \div 10^4$. Однако характеристика холостого хода машины постоянного тока нестабильна и при больших коэффициентах усиления получается разброс выходных характеристик.

Постоянная времени генератора с самовозбуждением больше, чем генератора с независимым возбуждением. Чтобы уменьшить постоянную времени, магнитную систему выполняют насыщенной, для чего в полюсах делают вырезы (рис. 5.81). Насыщение мостиков, образованных вырезами, обеспечивает наклон характеристики холостого хода

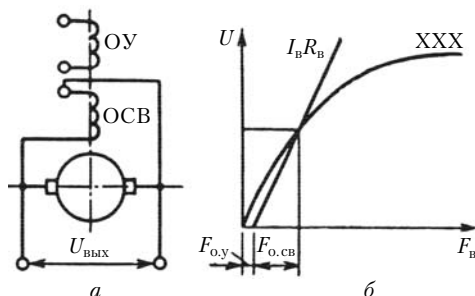


Рис. 5.80. ЭМУ продольного поля

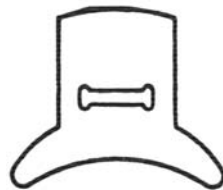


Рис. 5.81. Полюс с насыщающимися мостиками

уже при небольших МДС, что способствует устойчивой работе генератора при сопротивлении обмотки возбуждения, близком к критическому.

В системах возбуждения электрических машин широко применяются статические системы возбуждения с полупроводниковыми приборами. Однако электромашинные системы при сравнении с другими системами усиления имеют важное преимущество, состоящее в том, что в них происходит электрохимическое преобразование энергии, а для работы статических систем требуется источник электрической энергии.

Генератор с расщепленными полюсами. Для получения специальных внешних характеристик генераторов, обеспечивающих необходимые технологические требования приводных механизмов, применяются не только различные комбинации включения обмоток возбуждения (см. параграф 5.10), но и специальные конструкции генераторов постоянного тока.

На рис. 5.82 представлена схема генератора с расщепленными полюсами, имеющего внешние характеристики, которые необходимы для сварочных аппаратов (рис. 5.83).

В генераторе с расщепленными полюсами каждый полюс разделен на два полюса. Один из одноименных полюсов насыщен, а другой — не насыщен. Таким образом, полюсы N_1, S_1 не насыщены, а N_2, S_2 насыщены (см. рис. 5.82). Поток поперечной реакции якоря, направленный встречно с потоком возбуждения в ненасыщенных полюсах N_1, S_1 ослабляет поле в воздушном зазоре под этими полюсами. Однако

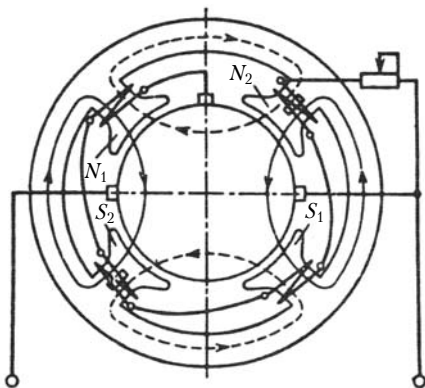


Рис. 5.82. Генератор с расщепленными полюсами

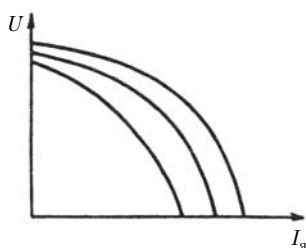


Рис. 5.83. Внешние характеристики генератора с расщепленными полюсами

из-за насыщения под насыщенными полюсами N_2 , S_2 увеличение потока происходит значительно медленнее и общий поток с ростом нагрузки уменьшается, что и обеспечивает необходимый вид внешних характеристик.

Обмотка возбуждения подключена к третьей щетке, которая расположена между одноименными полюсами (см. рис. 5.82). Так как в зоне коммутации этой щетки поле главных полюсов ослаблено, обеспечивается удовлетворительная коммутация. Напряжение на обмотке возбуждения при холостом ходе равно примерно половине напряжения на рабочих щетках. С ростом нагрузки оно изменяется мало, так как поток под насыщенным полюсом N_2 увеличивается незначительно. Можно считать, что обмотка возбуждения подключена к постоянному напряжению. При практически неизменном токе возбуждения поток в генераторе с расщепленными полюсами уменьшается с ростом нагрузки, что и обеспечивает падающий вид внешних характеристик. Переход с одной внешней характеристики на другую (см. рис. 5.83) осуществляется путем изменения сопротивления в контуре обмотки возбуждения или перемещения третьей щетки.

Потенциальная кривая на коллекторе в машине с расщепленными полюсами при холостом ходе сходна с потенциальной кривой на коллекторе обычной машины. С ростом нагрузки она деформируется и напряжения между коллекторными пластинами под ненасыщенными полюсами уменьшаются, а под насыщенными — остаются такими же, что и при холостом ходе.

В генераторах постоянного тока небольшой мощности иногда с помощью третьей щетки снимают напряжение для питания обмотки возбуждения, но из-за плохой коммутации трехщеточные генераторы с обычной магнитной системой, когда третья щетка помещается под полюсом, а коммутация происходит в зоне с большой индукцией, практически в настоящее время не находят применения.

Для получения внешних характеристик, похожих на характеристики сварочного генератора, могут быть использованы генераторы с поперечным возбуждением. Если в схеме ЭМУ поперечного поля исключить компенсационную об-

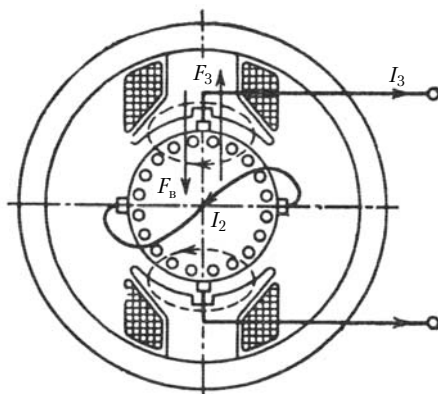


Рис. 5.84. Генератор с поперечным возбуждением

мотку, получим генератор с поперечным возбуждением (рис. 5.84). В этой машине при неизменном токе в обмотке возбуждения при изменении тока нагрузки I_3 поперечная реакция якоря F_3 , направленная встречно с МДС обмотки возбуждения F_v , будет при определенном конструктивном выполнении машины обеспечивать неизменные напряжение и ток на выходе генератора при изменении частоты вращения в широких пределах. Возрастание тока нагрузки приводит к увеличению потока реакции якоря F_3 , что ведет к уменьшению потока возбуждения и сохранению почти неизменными напряжения и тока нагрузки. При изменении направления вращения полярность выходного напряжения не изменяется. Такие генераторы применялись для освещения железнодорожных вагонов. В настоящее время для освещения вагонов применяются синхронные генераторы с клювообразными полюсами и выпрямителями в силовой цепи.

Униполярные генераторы и двигатели в теории электрических машин занимают особое место. Первой индуктивной электрической машиной, созданной М. Фарадеем в 1821 г., был униполярный двигатель (см. рис. 1.2). В этом двигателе проводник, в котором протекает постоянный ток, вращается вокруг постоянного магнита. При этом происходит преобразование электрической энергии в механическую. Проводник с током вращается вокруг постоянного магнита и только при условии наличия в цепи электрического тока скользящего контакта происходит электромеханическое преобразование энергии. Скользящий контакт в двигателе

Фарадея между неподвижной и вращающейся частями электрической цепи осуществлялся ртутью, налитой в чашку.

Униполярные машины в отличие от других машин не получают простыми построениями из обобщенной электрической машины, так как в статоре и якоре протекает постоянный ток. Однако, обращаясь к уравнениям электрической машины в осях d и q , следует отметить, что они описывают процессы преобразования энергии при протекании в обмотках электрической машины постоянных токов. Здесь важно сделать следующее замечание: если уравнения имеют решение, значит, должен быть и их физический аналог. В электромеханике таким аналогом уравнений электромеханического преобразования энергии являются униполярные электрические машины.

Если рассматривать униполярную машину со стороны электрической цепи, следует констатировать, что в униполярной машине есть два или несколько участков, имеющих различную скорость вращения.

Отличительной особенностью униполярных машин является то, что при обходе электрической цепи встречаются две или несколько подвижных и неподвижных частей, имеющих скользящий контакт.

На рис. 5.85 представлена современная схема униполярного генератора. Стальной массивный ротор 1, выполненный из одной поковки с валом, вращается в подшипниках 2. Обмотка возбуждения 3 создает постоянный поток Φ , который замыкается по статору, представляющему собой две стальные чаши 4, и по валу ротора. Эта машина имеет четыре зазора (два между ротором и статором и два между статором и валом ротора). Постоянный ток с вращающегося ротора снимается щетками 5, расположенными на внешней и внутренних частях ротора.

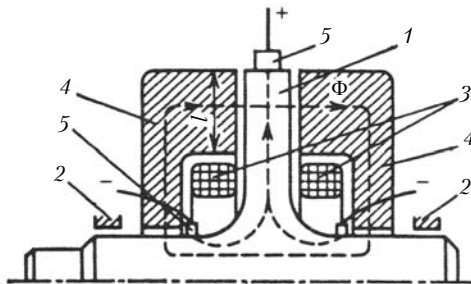


Рис. 5.85. Униполярный генератор

Работа щеточного контакта в униполярном генераторе по схеме рис. 5.85 проходит в тяжелых условиях, особенно для щетки, расположенной на внешней части ротора, где линейная скорость может превышать 100 м/с.

В униполярной машине по схеме рис. 5.86 условия работы щеточного контакта лучше. В этой машине щетки скользят по медным кольцам 6. Для уменьшения электрических потерь в пазы ротора 1 могут укладываться медные шины, по которым протекает ток нагрузки I . Как и в машине, показанной на рис. 5.85, 2 — подшипники, 3 — обмотки возбуждения (поток Φ здесь показан сплошными линиями), 4 — статор, 5 — щетки.

Униполярные генераторы обычно имеют один виток на роторе (см. рис. 5.85). Поэтому такие машины низковольтные. Они рассчитаны на большие постоянные токи.

Униполярные генераторы изготавливаются на напряжения в несколько вольт и токи до 100—150 кА. Однако в униполярных генераторах можно повысить напряжение. Для этого надо несколько щеток и колец соединить последовательно так, как это показано на рис. 5.86. В этом случае внутри якоря размещается система изолированных проводников.

Электродвижущая сила в униполярных генераторах пропорциональна индукции в зазоре, активной длине ротора l и частоте вращения ротора. Поэтому при проектировании униполярных машин стремятся к увеличению индукции и частоты вращения.

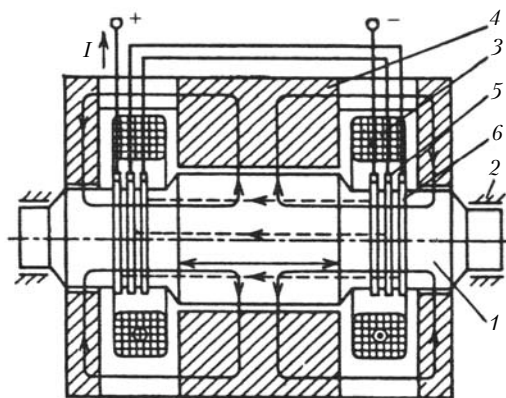


Рис. 5.86. Униполярный генератор с последовательным соединением щеток

Униполярные машины, как и все электрические машины, обратимы. Но чаще униполярные машины используются в генераторном режиме. Униполярные генераторы применяются для питания электролизных ванн и электропечей, а также в ударных генераторах для физических исследований поведения плазмы в сильных магнитных полях. То есть в тех случаях, где требуются большие постоянные токи низкого напряжения.

За полтора века, прошедших после изобретения М. Фарадеем униполярного двигателя, были созданы сотни оригинальных униполярных машин. Но, пожалуй, самой замечательной униполярной машиной является наша планета Земля.

Электромеханическая система планеты состоит из МГД-генератора и униполярного двигателя, совмещенных в одной сферической машине (рис. 5.87). Магнитное поле Земли создается токами ядра Земли ($I_{я.з.}$), токами радиационных поясов ($I_{р.п.}$) и поперечными токами ($I_{п.}$). Токи $I_{я.з.}$ замыкаются на границе твердого (1) и жидкого ядра (2), а токи $I_{р.п.}$ — на границе стратосферы Земли (5) и космоса. Поперечный ток ($I_{п.}$) — это ток реакции якоря униполярного двигателя, и замыкается он на границе литосферы (4) и жидкой магмы (3).

Поперечный ток, взаимодействуя с токами $I_{я.з.}$ и $I_{р.п.}$, смещает ось магнитного поля относительно оси вращения Земли на $10 \div 11^\circ$, точно так же, как это имеет место в обычных машинах постоянного тока.

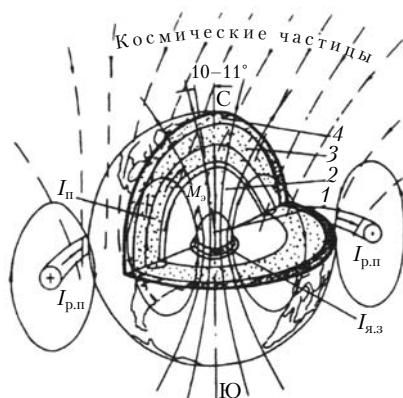


Рис. 5.87. Униполярный двигатель — планета Земля

МГД-генератор получает энергию из космоса, поддерживая миллиарды лет токи $I_{я.з.}$, $I_{р.п.}$ и $I_{п.}$ и работу униполярного двигателя (насоса) планеты.

Статором униполярного двигателя являются твердое ядро и твердая магма и кора Земли, а ротором — жидкая магма, движущаяся между литосферой и твердым ядром. Униполярный двигатель — это сферический гидродин

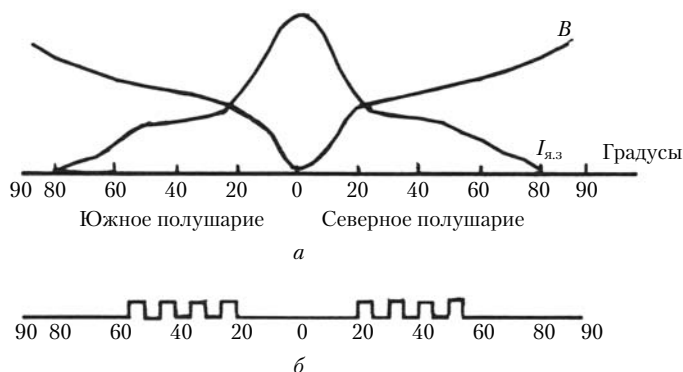


Рис. 5.88. Распределение индукции и токов в униполярном двигателе планеты

с жидким ротором. Струи жидкой магмы опускаются в экваториальной зоне, ускоряются в средних широтах ядра Земли, где расположены двигатели северного и южного полушарий. Распределение индукции и токов на плоском изображении поверхности твердого ядра показано на рис. 5.88, а. На рис. 5.88, б дано предполагаемое распределение гладких и бугристых зон. Преобразование электрической энергии в механическую в униполярном двигателе планеты происходит по тем же законам, что и в МГД-насосе. Электромагнитный момент двигателя планеты обуславливает протекание глобальных энергетических событий на Земле — таких как тайфуны, землетрясения, циклоны и антициклоны. Галактический цикл определяет глобальный электромеханический переходный процесс, с которым связаны потепление и глобальное изменение климата. Новое научное направление — геоэлектромеханика имеет важное значение для развития наук о Земле.

Подробно работа электрической машины — планеты Земля — рассмотрена в работе [5].

Как и в униполярных машинах, магнитное поле жестко связано с токами, а токи — с ядром Земли. В этой гигантской униполярной машине скользящими контактами являются тысячекилометровые слои магмы, практически неподвижные относительно друг друга на расстояниях сотен километров, но каждый участок имеет различную скорость.

Изучение униполярной индукции в глобальных масштабах имеет важное значение и может оказаться полезным для практических применений.

Униполярная индукция в слабых магнитных полях может проявлять себя также при больших скоростях движения объектов и изменении площади, охватываемой контуром, в котором замыкаются токи [6].

Магнетогидродинамические генераторы (МГД-генераторы) — это электромеханические преобразователи механической энергии плазмы или жидкости в электрическую энергию [11]. МГД-генераторы состоят из МГД-канала 1, в котором расположены электроды 2, а магнитное поле \vec{B} создается катушками 3 (рис. 5.89).

Плазма, двигаясь в магнитном поле со скоростью \vec{v} , создает на электродах постоянное напряжение, и в нагрузке R_n протекает ток нагрузки I . Ток нагрузки замыкается поперек канала. Чтобы увеличить мощность МГД-генератора, в плазму добавляются присадки щелочных металлов, увеличиваются скорость и температура плазмы. Для увеличения индукции в канале до 5 Тл применяются катушки со сверхпроводящими обмотками 3.

В МГД-генераторе механическая энергия частиц плазмы преобразуется в электрическую энергию и тепло. За счет разностей скоростей на выходе и входе v_2 и v_1 и температур на входе и выходе t_1 и t_2 осуществляется преобразование энергии в МГД-генераторе.

При постоянной массе плазмы за счет уменьшения температуры часть тепловой энергии преобразуется в механическую энергию, а затем — в электрическую. Чем больше убыль кинетической энергии плазмы, тем большая часть тепловой энергии преобразуется в электрическую энергию.

Электроды в МГД-генераторе работают в тяжелых условиях — температура внутри канала около 2000 К. Поэтому целесообразно использовать МГД-генератор в кратковременных режимах работы.

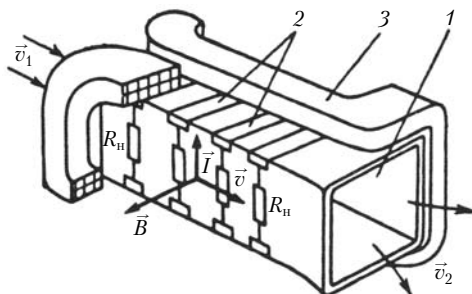


Рис. 5.89. МГД-генератор

Плазму или газ в МГД-генераторе можно заменить электропроводящей жидкостью. Считая, что жидкость в канале движется во всех слоях с одинаковой скоростью и ротор состоит из одного слоя, можно рассчитать ЭДС, наводимую на электродах, по закону электромагнитной индукции.

Как и все электрические машины, МГД-генераторы могут работать в режиме двигателя. Для перекачки жидких металлов применяются МГД-насосы (рис. 5.90). В МГД-насосах электрическая энергия постоянного тока преобразуется в механическую энергию движения жидкости. Такие насосы находят применение на атомных электростанциях для перекачки жидкотеплоносителя первого контура. На рис. 5.90 обозначения те же, что и на рис. 5.89.

Иногда говорят, что в МГД-генераторе происходит непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую. При этом имеют в виду, что на МГД-электростанциях не требуется паровая турбина, преобразующая тепловую энергию в механическую. В МГД-генераторе частицы ионизированного газа или плазмы, получив ускорение в парогенераторе, отдают механическую энергию в канале МГД-генератора, где она преобразуется в электрическую энергию. Тепловая энергия, неиспользованная в МГД-канале, преобразуется в электрическую энергию по классическому циклу: парогенератор — паровая турбина — турбогенератор. В настоящее время спроектирован МГД-генератор на 500 МВт со сроком службы канала две недели.

МГД-генератор по схеме рис. 5.89 открытого цикла называют генератором фарадеевского типа. М. Фарадей в 1834 г. измерил напряжение между берегами р. Темзы, подключив вольтметр в струи воды у правого и левого берегов. Струи воды двигаются в магнитном поле Земли и, так же как в канале МГД-генератора, в реках может наводиться ЭДС.

Явления униполярной индукции оказывают важное влияние на глобальные процессы преобразования энергии на Земле и в космосе. Электромеханическое преобразование энергии во многом определяет энергетические процессы на

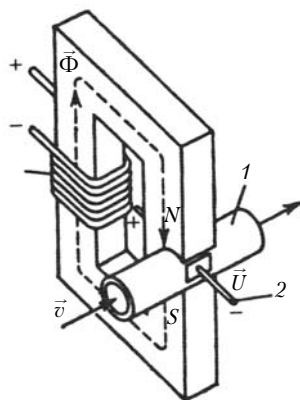


Рис. 5.90. МГД-насос

Земле и в космосе. Человек только подошел к техническим применениям таких источников энергии, как космос. Теория электромеханического преобразования энергии, рассматриваемая в данной книге, является составной частью космической электромеханики [6].

Исполнительные двигатели постоянного тока находят широкое применение в системах автоматического управления. Двигатели постоянного тока обеспечивают в широком диапазоне экономичное регулирование частоты вращения как за счет изменения потока, так и за счет изменения напряжения. Благодаря тому что обмотка якоря — многофазная, двигатели постоянного тока имеют высокую равномерность частоты вращения.

При конструировании исполнительных двигателей постоянного тока стремятся обеспечить высокое быстродействие. Одним из способов уменьшения электромеханической постоянной времени является уменьшение момента инерции.

Основными типами малоинерционных исполнительных двигателей являются двигатели с полым ротором и печатной обмоткой якоря.

Двигатели постоянного тока с полым ротором (ДПР) имеют два статора (рис. 5.91), как и двигатели с полым ротором переменного тока. На одном из подшипниковых щитов 1 укреплен постоянный магнит 2. Магнитный поток замыкается по корпусу 3. Обмотка якоря выполнена двухслойной и образует ротор 4 при заливке ее специальным компаундом. После формовки образуется монолитный полый цилиндр, насаженный на вал 5. Концы обмотки выведены на коллектор 6, на котором установлены щетки 7. Одним из достоинств двигателей постоянного тока с полым ротором

является хорошая коммутация.

Серия ДПР включает в себя двигатели мощностью от 0,12 до 37 Вт, имеет высокий КПД, а постоянные времени ниже, чем у обычных двигателей той же мощности, в 2—2,5 раза.

Двигатели с печатной обмоткой (рис. 5.92) имеют дисковый якорь из изоляционного материала, по

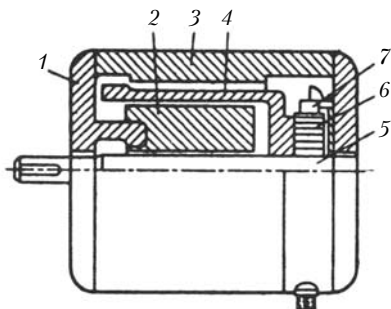


Рис. 5.91. Малоинерционный двигатель постоянного тока



Рис. 5.92. Якорь с печатной обмоткой

двигателя — явнополюсный и несет трехфазную сосредоточенную обмотку 3, расположенную на полюсах 4. Три конца обмотки присоединены к трехпластинчатому коллектору 5, а другие концы соединены между собой. Таким образом, обмотки якоря соединяются в трехфазную звезду. По коллекторным пластинам скользят щетки 6, к которым подводится постоянное напряжение от батарейки.

На примере этой простейшей машины постоянного тока можно показать общность машин переменного и постоянного тока. Если к обмотке якоря машины на рис. 5.93 подвести трехфазный переменный ток, а статору дать возможность вращаться, получится простейшая синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов. В этом случае коллектор со щетками не нужен. Когда двигатель подключается к источнику постоянного тока, необходим преобразователь частоты. В простейшем виде — это трехпластинчатый коллектор.

Машины постоянного тока широко применяются в качестве датчиков ускорения, датчиков положения, тахогенераторов и других индикаторных устройств.

Тахогенератор постоянного тока — это ненамагниченный генератор постоянного тока с электро-

обе стороны которого располагается печатная обмотка. Печатная обмотка выполняется из фольги, щетки скользят непосредственно по обмотке. Двигатель с печатной обмоткой имеет торцевую конструкцию [15].

Двигатели постоянного тока для детских игрушек выпускаются в количестве нескольких миллионов штук в год. Статор двигателя (рис. 5.93) состоит из корпуса 1, в котором укреплены постоянные магниты 2. Якорь

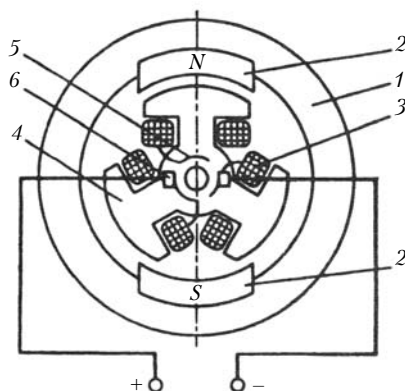


Рис. 5.93. Двигатель постоянного тока с трехпластинчатым коллектором

магнитным возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов. Выходная характеристика тахогенератора $U = f(n)$ — прямая линия. Влияние реакции якоря устраняется за счет того, что машина делается ненасыщенной или, наоборот, насыщенной. Как в том, так и в другом случае генератор работает на линейной части характеристики холостого хода. Достоинством тахогенераторов постоянного тока является меньшая масса при той же чувствительности по сравнению с тахогенераторами переменного тока.

Машины постоянного тока предельной мощности. Предельная мощность машин постоянного тока определяется предельным диаметром $D_{\max} \approx 4$ м, что диктуется железнодорожными габаритами. Максимальная линейная нагрузка A из опыта конструирования равна примерно $550 \cdot 10^2$ А/м. Главное ограничение — среднее напряжение между коллекторными пластинами, а также коммутация. Для машины с компенсационной обмоткой $U_{\text{к. ср}} = 30$ В, а без компенсационной обмотки 18 В.

Предельную мощность машины постоянного тока можно определить по формуле

$$P = 3AU_{\text{к. ср}} \frac{v_a}{n} \frac{a}{pw_c}, \quad (5.91)$$

где v_a — линейная скорость якоря (принимается не более 70–80 м/с); w_c — число витков в секции (в машинах предельной мощности, как правило, $w_c = 1$).

При $v_a = 70$ м/с, $w_c = 1$, $A = 550 \cdot 10^2$ А/м

$$Pn \approx 2 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{об/мин}. \quad (5.92)$$

Из выражения (5.92) следует, что при $n = 1000$ об/мин предельная мощность равна 2000 кВт, при $n = 3000$ об/мин — 600 кВт, при $n = 6000$ об/мин — 300 кВт, а при $n = 12\,000$ об/мин — всего 100 кВт.

Среднее напряжение между коллекторными пластинами ограничивает напряжение машин постоянного тока и не позволяет сделать его более 1–2 кВ. В практике электромашиностроения выполнялись машины постоянного тока на 10–20 кВ. Для обеспечения надежной работы генератора на коллекторе между щетками устанавливаются барьеры, препятствующие возникновению дуги между щетками.

Рассмотренные специальные машины постоянного тока охватывают лишь часть применений машин постоянного тока. Эти конструктивные видоизменения демонстрируют

возможности использования физических процессов электромеханического преобразования энергии в машинах постоянного тока.

5.13. Вентильные двигатели

При рассмотрении обобщенной машины было отмечено, что в машине постоянного тока механический преобразователь частоты — коллектор может быть заменен полупроводниковым преобразователем частоты на тиристорах или транзисторах. Вентильные двигатели — это электрические машины, функционально объединенные с управляемым полупроводниковым коммутатором. Они близки по конструктивным признакам и характеристикам к коллекторным двигателям. Так же как и коллекторные двигатели, вентильные двигатели имеют частоту вращения вала, не зависящую от частоты сети, регулирование частоты вращения осуществляется путем изменения потока возбуждения и тока в якоре. Вентильные двигатели обладают высоким пусковым моментом и хорошими энергетическими показателями. Благодаря отсутствию коллекторно-щеточного узла вентильные двигатели имеют большую надежность и долговечность.

Вентильные двигатели, как и коллекторные, имеют широкое разнообразие конструкций и схем включения обмоток.

На рис. 5.94 представлена схема вентильного двигателя, который имеет такую же обмотку якоря, как и машина по-

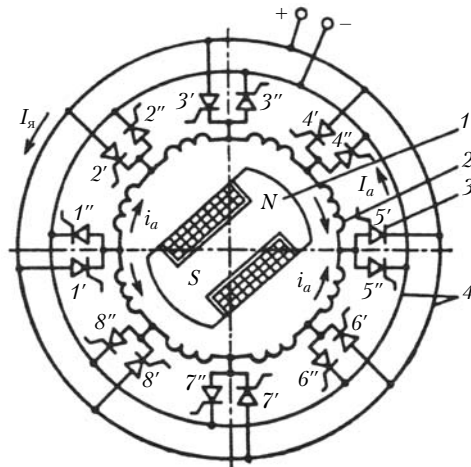


Рис. 5.94. Многофазный вентильный двигатель

стоянного тока. На роторе вентильного двигателя 1 расположены обмотка возбуждения или постоянные магниты. В пазах статора располагается многофазная обмотка якоря 2, секции или группа секций которой присоединены через полупроводниковые блоки 3 к распределительным шинам 4 и сети.

В положении, показанном на рис. 5.94, открыты тиристоры 1' и 5''. Ток якоря $I_{\text{я}}$ в обмотке статора проходит по двум параллельным ветвям, и, как в обращенной машине постоянного тока, создается вращающий момент. При движении ротора происходит переключение тириستоров датчиками положения ротора.

При повороте ротора по часовой стрелке на угол $360/m$, где m — число отпаяк (фаз) обмотки якоря (в рассматриваемой машине $m = 8$), происходит переключение тиристоров. Включаются тиристоры 2' и 6'', а 1' и 5'' — отключаются и т.д.

Таким образом, при вращении ротора вращается и поле якоря. При этом, как и в обычной машине, происходит электро-механическое преобразование энергии.

При реверсе работают пары тиристоров: 1'' и 5', 2'' и 6' и т.д. Включение и отключение тиристоров осуществляется путем подачи импульсов напряжения со специальных датчиков, реагирующих на положение ротора.

Коммутатор по схеме рис. 5.94 получается громоздким, и вентильные двигатели по этой схеме практически не применяются.

Чтобы упростить коммутатор, надо уменьшить число фаз машины.

Простейшей схемой вентильного двигателя является двухфазная схема, но наибольшее применение нашла трехфазная схема (рис. 5.95). В этой схеме вентильная коммутация осуществляется трехфазным инвертором.

Система вентильной коммутации обычно состоит из датчика синхронизирующих сигналов, системы формирования сигналов управления и управляемого коммутатора.

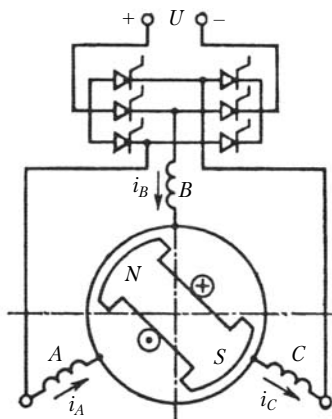


Рис. 5.95. Схема трехфазного вентильного двигателя

Датчик синхронизирующих сигналов задает порядок и частоту переключения элементов коммутатора. При позиционном управлении — это датчик положения ротора, а при фазовом — датчик фазы напряжения якорной обмотки. Датчик положения ротора представляет собой встроенный в машину узел, состоящий из чувствительных элементов, закрепленных на статоре, и сигнальных элементов, закрепленных на роторе. Обычно используются фотоэлектрические или магнитомодуляционные датчики.

Система формирования сигналов управления обеспечивает усиление и формирование синхронизирующих сигналов.

Управляемый коммутатор осуществляет бесконтактные переключения в силовых цепях вентильного двигателя и выполняется на полупроводниковых приборах или других переключающих элементах, например герконах.

В управляемых коммутаторах на полупроводниковых приборах используются полностью управляемые приборы (транзисторы, двухоперационные тиристоры) и не полностью управляемые (тиристоры, семисторы).

По способу коммутации управляемые коммутаторы на не полностью управляемых полупроводниковых приборах можно разделить на три вида: с естественной, принудительной и смешанной коммутацией. При естественной коммутации переключения происходят под действием ЭДС якорной обмотки. При принудительной коммутации управление тиристорами осуществляется под действием коммутирующего напряжения отдельного источника либо напряжения питающей сети. При смешанной коммутации имеет место комбинация первого и второго способов.

Вентильные двигатели могут питаться от сети как постоянного, так и переменного тока. Если управляемый коммутатор питается от сети постоянного тока, он представляет собой инвертор — преобразователь постоянного тока в переменный. Если управляемый коммутатор подключен к сети переменного тока, он выполняет функции преобразователя частоты.

Комбинации различных структур управляемых коммутаторов, способов инвертирования, типов ключевых элементов и схем их коммутации позволяют получить весьма обширную гамму коммутаторов, которые подробно рассматриваются в курсе промышленной электроники. Однако, несмотря на разнообразие, схемы управляемых коммутаторов

можно разделить по принципу преобразования электрических величин на преобразователи напряжения и тока.

В схеме инвертора напряжения в течение межкоммутационного интервала напряжение на нагрузке равно напряжению звена постоянного тока. Переток реактивной мощности обеспечивается обратным мостом и конденсатором.

В схеме инвертора тока благодаря сглаживающему реактору входной ток не меняет своего значения при переключениях вентилей.

Напряжение на нагрузке повторяет форму ЭДС фазы якоря. В инверторе напряжения синхронизируется фаза основной гармоники напряжения, а в инверторе тока — фаза основной гармоники тока.

Электромеханическая часть вентильных двигателей постоянного тока, как правило, аналогична известным конструктивным модификациям синхронных машин. Для мало-мощных приводов используются двигатели с постоянными магнитами, а также гистерезисные, реактивные и индукторные двигатели. В приводах средней и большой мощности используются двигатели с электромагнитным возбуждением.

Обычно конструкция вентильного двигателя идентична конструкции общепромышленных синхронных двигателей. Поскольку вентильные двигатели средней и большой мощности, как правило, питаются от управляемых коммутаторов, работающих в режиме инвертора тока с естественной или смешанной коммутацией, одним из требований к ним является минимальная длительность процесса коммутации. В целях снижения x_d'' и x_q'' вентильные двигатели средней и большой мощности снабжают демпферной обмоткой с минимальным сопротивлением. Демпферная обмотка выполняется медной и имеет сечение проводников не менее 15÷20% сечения проводников якорной обмотки. В ряде применений целесообразно для снижения x_d'' и x_q'' использовать якорь с беспазовой укладкой обмотки в немагнитном слое.

В первом приближении расчет вентильных двигателей можно проводить считая, что источник питания — управляемый коммутатор имеет бесконечную мощность. Тогда расчет электромеханической части вентильного двигателя проводится по обычной методике с учетом несинусоидальности питающего напряжения.

Средний электромагнитный момент определяется так же, как и в синхронных машинах.

Как и двигатели с механическим коллектором, вентильные двигатели позволяют регулировать частоту вращения вверх от номинальной путем изменения тока в обмотке возбуждения, а вниз от номинальной — путем изменения тока в якоре.

Если полюсное регулирование частоты вращения не вызывает затруднений, то якорное регулирование, обеспечивающее широкий диапазон изменения частоты вращения, требует усложнения управляемых коммутаторов. Для этого в цепь якоря вводится широтно-импульсный модулятор. При якорном управлении вентильными двигателями средней и большой мощности регулирование частоты вращения осуществляется за счет регулирования тока в управляемом выпрямителе. Как и в двигателях постоянного тока, при глубоком регулировании частоты вращения вентильных двигателей усложняется схема регулирования и растут потери в коммутаторе.

Характерной особенностью вентильных двигателей, отличающей их от двигателей постоянного тока, является наличие дополнительного канала управления по углу синхронизации инвертора. Этот канал используется для обеспечения необходимой жесткости механической характеристики и достижения большей перегрузочной способности.

Вентильные двигатели применяются и в приводах небольшой мощности, где нежелательно применение механического коммутатора (проигрыватели, приборы магнитной записи и др.). Вентильные двигатели большой мощности нашли применение там, где ранее использовались нерегулируемые асинхронные или синхронные двигатели. Выполнены вентильные двигатели мощностью 1600 кВт с регулированием частоты вращения для привода компрессоров холодильных машин и насосов циркуляционных систем.

Особенно удачным является применение вентильных двигателей в космической электромеханике. Наличие сети постоянного тока и основное требование к двигателям — надежность и большой срок службы обеспечили широкое применение бесконтактным двигателям постоянного тока (БДПТ). На космических летательных аппаратах используют три серии БДПТ, работающие практически на всех искусственных спутниках Земли. Если в земных условиях основным двигателем является асинхронный двигатель, то в космосе — БДПТ [6].

5.14. Машины постоянного тока, выпускаемые в России и странах СНГ

В истории развития машин постоянного тока было два периода, когда предполагали, что они не будут выпускаться промышленностью. Первый период относится к началу XX в., когда победное шествие переменного тока, казалось, вытеснит постоянный ток и останутся только машины переменного тока. Второй период относится примерно к полувекковой давности, когда стремительное развитие полупроводниковой техники, казалось, должно было вытеснить механический преобразователь частоты — коллектор и машины постоянного тока в классической конструкции не будут выпускаться. Однако развитие электромашиностроения опровергло эти предположения.

Машины постоянного тока благодаря экономичному регулированию частоты вращения, благоприятным механическим характеристикам и появлению новых источников постоянного тока нашли новые области применения и выдержали конкуренцию с машинами переменного тока.

Основные серии машин постоянного тока общего назначения — 2П и 4П. Помимо этих серий выпускаются серии краново-металлургических двигателей и серии специализированного назначения [7].

Серия 2П включает в себя двигатели мощности от 0,13 до 200 кВт с высотой оси вращения 90—135 мм. Для замены двигателей серии П габаритов 12—26 выпускается серия П2.

Разработана новая серия машин постоянного тока 4П, которая имеет лучшие технико-экономические показатели и использует некоторые узлы и детали асинхронных двигателей серии 4А.

Двигатели серий 2П и 4П выпускаются на напряжения 110, 220, 340 и 440 В, на номинальные частоты вращения 750, 1000, 1500, 2200 и 3000 об/мин. Машины выполняются в защищенном исполнении с самовентиляцией и независимой вентиляцией от постороннего вентилятора; в закрытом исполнении — с естественным охлаждением и наружным обдувом от постороннего вентилятора.

Двигатели серии 2П имеют независимое возбуждение и компенсационную обмотку, обеспечивающую большие кратковременные перегрузки и широкий диапазон изменения частоты вращения.

Для металлургических, крановых, экскаваторных и других электроприводов выпускаются двигатели постоянного тока серии Д. Двигатели имеют мощность от 2,5 до 185 кВт, напряжение 220 и 440 В и номинальную частоту вращения 400—1440 об/мин. Масса двигателя мощностью 2,5 кВт 130 кг, а двигателя 185 кВт — 3745 кг.

Двигатели серии Д обладают малым моментом инерции и обеспечивают регулирование частоты вращения в широких пределах. Максимальная частота вращения примерно в 3 раза выше номинальной.

Для горнодобывающей, металлургической и других отраслей промышленности выпускаются уникальные машины постоянного тока.

Для электроприводов шагающих экскаваторов с ковшом объемом от 15 до 100 м³ и стрелой до 100 м разработан комплекс электрооборудования, включающий двигатели и генераторы постоянного тока. В комплекс входят: электродвигатель постоянного тока вертикального исполнения типа МПВЭ-450-29 для привода механизма вращения мощностью 450 кВт и напряжением 370 В, частотой вращения 29 об/мин, массой 36 т; электродвигатель типа МПЭ-1000-630 УХЛЗ в горизонтальном исполнении для привода механизма подъема и тяги мощностью 1000 кВт, напряжением 600 В, частотой вращения 630/1000 об/мин, массой 8460 кг. Генераторы постоянного тока ГПЭ-1250 обеспечивают питание главных приводов постоянного тока. Мощность генератора 1250 кВт, напряжение 930 В, частота вращения 1000 об/мин, масса 14 т.

Для буровых установок выпущен двигатель типа ДЭВ-808 мощностью 68 кВт, напряжением 440 В, частотой вращения 1200 об/мин, массой 920 кг. Для морских буровых установок в морском взрывозащищенном исполнении создан двигатель типа МПП-1000-1000МЗ мощностью 1000 кВт, напряжением 600 В, частотой вращения 1000 об/мин, массой 62 500 кг.

Создан тяговый генератор типа ГПА-600 для питания тяговых двигателей мотор-колеса. Мощность генератора 630 кВт, масса 2480 кг.

Для электровозов и тепловозов выпускаются тяговые двигатели мощностью до 8 МВт. Для мощных ледоколов, прокатных станов изготавливаются двигатели постоянного тока до 30 МВт в двух-, трех- и четырехъякорном исполнениях. Большое число различных типов двигателей постоянного

тока выпускается для летательных аппаратов, автомобилей и тракторов.

Микродвигатели постоянного тока изготавливаются несколькими сериями. Серия ПЛ включает в себя двигатели независимого возбуждения мощностью от 30 до 600 Вт, напряжением 110 и 220 В и частотой вращения 1400 и 2700 об/мин.

Микродвигатели постоянного тока с постоянными магнитами входят в серию ДПМ и имеют мощность от долей ватта до десятков ватт и напряжение 12, 14 и 27 В.

Малоинерционные исполнительные микродвигатели постоянного тока имеют якорь, выполненный в виде полого цилиндра или диска с печатной обмоткой. Эти двигатели с постоянными магнитами объединяются серией ДПР. Машины данной серии могут применяться в качестве тахогенераторов.

Производится большое количество двигателей постоянного тока для детских игрушек с питанием от батареи 4 В.

Выпускаются универсальные коллекторные двигатели серий УЛ, УМТ и МУН, работающие на постоянном и переменном токе. В настоящее время широкое распространение получили аккумуляторные электроинструменты (дрели, «болгарки», лобзики, шуруповерты), в связи с чем объемы выпуска коллекторных двигателей постоянного тока различных модификаций резко увеличились. Их мощность от 10 до 600 Вт.

Глава 6

КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

6.1. Электромеханическое преобразование энергии в коллекторных машинах переменного тока

Коллекторные машины переменного тока подсоединяются к сети переменного тока (рис. 6.1). Неизменная частота сети f_c преобразователем частоты ПЧ преобразуется в изменяющуюся частоту $f = \text{var}$. За счет изменения частоты в коллекторных двигателях переменного тока обеспечивается регулирование частоты вращения в широких пределах.

Коллекторные машины переменного тока применяются в регулируемых приводах переменного тока для получения частоты вращения выше синхронной частоты вращения поля. Коллекторные машины переменного тока находят наибольшее применение в однофазных сетях для привода бытовых приборов.

В некоторых западноевропейских странах коллекторные двигатели переменного тока используются в качестве тяговых двигателей. Трехфазные коллекторные двигатели пере-

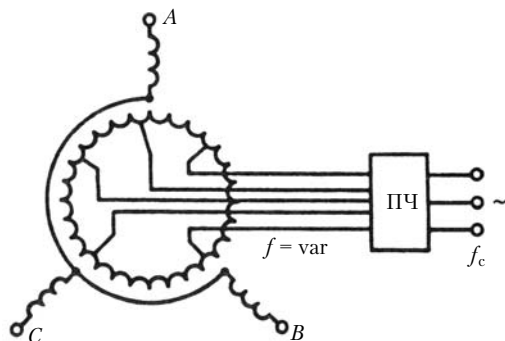


Рис. 6.1. Схема коллекторной машины переменного тока

менного тока выпускаются в небольших количествах мощностью в десятки и сотни киловатт.

Основным недостатком коллекторных машин переменного тока является плохая коммутация. Механический преобразователь частоты — коллектор в этих машинах работает в режиме преобразования переменного тока в переменный ток регулируемой частоты. Непосредственное преобразование переменного тока в переменный ток другой частоты без промежуточного звена постоянного тока осуществляется довольно сложно как в механическом преобразователе частоты, так и в полупроводниковом преобразователе частоты.

Коллекторные машины переменного тока из модели обобщенной машины получаются, если многофазную обмотку якоря привести к двухфазной, а на преобразователь частоты подать переменный ток (см. рис. 1.29).

В воздушном зазоре коллекторной машины переменного тока поля основной гармоник ротора и статора неподвижны относительно друг друга и существуют бесконечные спектры высших гармоник, поля которых перемещаются относительно друг друга. Подобная картина полей существует в воздушном зазоре и других типов электрических машин.

Дифференциальные уравнения коллекторных машин переменного тока могут быть записаны в виде (1.108)—(1.119). Однако динамике коллекторных двигателей переменного тока посвящено небольшое число работ, а при проектировании используются более простые формулы, так как геометрия коллекторного двигателя переменного тока в основном определяется коммутацией.

Коллекторные двигатели переменного тока получили наибольшее распространение и развитие в начале XX в. Были предложены десятки оригинальных схем коллекторных двигателей переменного тока. Коллекторные двигатели переменного тока постепенно вытесняются регулируемые приводами с асинхронными и синхронными двигателями. Трудоемкость изготовления коллектора и плохая коммутация ограничивают применение коллекторных двигателей переменного тока.

Большой вклад в развитие теории коллекторных двигателей переменного тока внесли Г. Гергес, И. Дери, Д. А. Заваляшин, М. П. Костенко, М. Латур, Э. Томсон, Р. Рихтер, К. И. Шенфер и др. [3].

6.2. Трехфазные коллекторные двигатели

Наибольшее распространение среди трехфазных коллекторных двигателей получили трехфазные коллекторные двигатели с параллельным возбуждением с двойным комплектом щеток, например двигатель Шраге — Рихтера (рис. 6.2), который был предложен в 1910 г. почти одновременно Х. Шраге и Р. Рихтером.

Конструкция названного двигателя сходна с конструкцией асинхронного двигателя с фазным ротором. Отличие состоит в том, что в пазах ротора располагается вторая многофазная обмотка, секции которой выводятся на коллектор. Двигатель позволяет регулировать частоту вращения в широких пределах за счет введения в цепь вторичной обмотки добавочной ЭДС $\pm \Delta \dot{E}$.

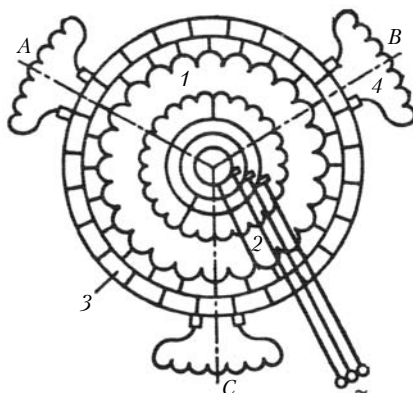


Рис. 6.2. Двигатель Шраге — Рихтера

Трехфазное напряжение сети через щетки и кольца подводится к фазной обмотке ротора 1. В пазах ротора располагается вторая обмотка 2 — двухслойная, многофазная, секции которой выведены на коллектор 3. На коллекторе находятся три пары щеток, к которым подключены три фазы обмотки статора 4. Обмотка статора — обычная двухслойная или однослойная обмотка, расположенная в пазах. Конструкция машины — обращенная, вторичная обмотка расположена на статоре, а напряжение подводится к ротору.

Магнитное поле, созданное обмоткой ротора в воздушном зазоре, вращается в сторону, противоположную вращению ротора, и наводит в обмотке статора ЭДС скольжения $f_1 = f_2 s$. С обмотки ротора 2, выведенной на коллектор через щетки, также снимается ЭДС скольжения $f_1 = f_2 s$. Амплитуда этой ЭДС зависит от того, насколько раздвинуты щетки (рис. 6.3). Когда щетки занимают положение, показанное на рис. 6.3, а, $\Delta \dot{E}$ вычитается из ЭДС \dot{E}_1 , наводимой в обмотке статора. Когда положения щеток совпадают (рис. 6.3, б), $\Delta \dot{E} = 0$. При положении щеток, показанном на рис. 6.3, в, ЭДС $\Delta \dot{E}$ складывается с \dot{E}_1 .

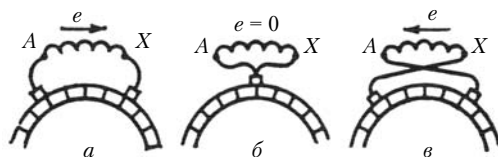


Рис. 6.3. Регулирование $\Delta \dot{E}$ путем изменения положения щеток

Если $\Delta \dot{E}$ вычитается, ЭДС \dot{E}_1 уменьшается, что приводит к уменьшению тока \dot{I}_1 и снижению частоты вращения. Когда $\Delta \dot{E} = 0$, двигатель работает как асинхронный. При положении щеток, соответствующем рис. 6.3, в, $\Delta \dot{E}$ складывается с \dot{E}_1 и частота вращения становится выше синхронной. Перемещение щеток по коллектору осуществляется механизмом, который вращается вручную или с помощью приводного двигателя.

Введение добавочной ЭДС в цепь статора позволяет регулировать и реактивную мощность. Для этого щетки смещаются несимметрично (рис. 6.4). При этом $\Delta \dot{E}$ вводится под углом к \dot{E}_1 , что приводит к изменению реактивной составляющей тока \dot{I}_1 и изменению $\cos \varphi$ двигателя.

Рабочие характеристики двигателя Шраге — Рихтера сходны с характеристиками асинхронного двигателя. Пуск в ход осуществляется прямым включением в сеть.

Для составления уравнений электромеханического преобразования энергии в таком двигателе можно воспользоваться уравнениями асинхронной машины. При этом необходимо учесть наличие во вторичной обмотке ЭДС $\Delta \dot{E}$, увеличение сопротивления за счет обмотки 2 (см. рис. 6.2) и дополнительную МДС от тока, протекающего во вторичной обмотке.

Коммутация в коллекторных двигателях переменного тока отличается от коммутации машин постоянного тока, так как наряду с реактивной ЭДС в коммутируемых секциях наводится трансформаторная ЭДС вследствие изменения основного потока. Трансформаторная ЭДС зависит от нагрузки и сдвинута по фазе относительно реактивной ЭДС.

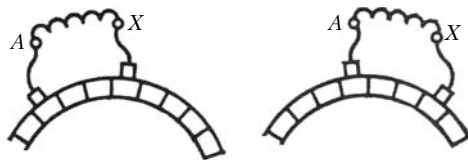


Рис. 6.4. Регулирование $\cos \varphi$ путем несимметричного изменения положения щеток

В большинстве типов коллекторных двигателей переменного тока добавочные полюсы не применяются, поскольку коммутация происходит в зоне рабочего поля и скомпенсировать трансформаторную ЭДС не удастся.

Двигатели Шраге — Рихтера выполняются мощностью 1,5—250 кВт с пределами регулирования частоты вращения 2:1 или 4:1. Наличие трех пар щеток, затрудненная коммутация и ручное управление ограничивают применение таких двигателей. В СССР двигатели Шраге — Рихтера электротехнической промышленностью не выпускались.

Трехфазные коллекторные двигатели с параллельным возбуждением с питанием через статор обладают теми же характеристиками, что и двигатели Шраге — Рихтера, но ЭДС ΔE вводится в цепь ротора с помощью трансформатора с регулируемым вторичным напряжением или с помощью индукционного регулятора (рис. 6.5). Обмотка статора 1, который ничем не отличается от статора асинхронной машины, присоединена к сети U_1, f_1 . На роторе имеется многофазная обмотка 2 с секциями, выведенными на коллектор. В роторе наводится ЭДС частотой $f_2 = f_1 s$. Добавочная ЭДС вводится с помощью регулировочного устройства 3.

Для улучшения коммутации иногда устанавливают вместо трех щеток шесть, т.е. применяют вместо трехфазной системы регулирования ЭДС ΔE шестифазную. Это снижает ток фазы ротора и уменьшает реактивную ЭДС.

Трехфазные коллекторные двигатели последовательного возбуждения имеют последовательно соединенные обмотки статора и ротора (рис. 6.6). Регулирование частоты вращения осуществляется путем поворота щеток или изме-

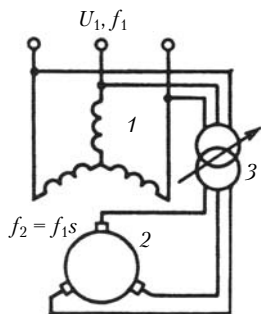


Рис. 6.5. Трехфазный коллекторный двигатель с параллельным возбуждением

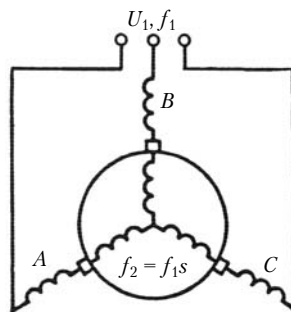


Рис. 6.6. Трехфазный коллекторный двигатель с последовательным возбуждением

нения подводимого напряжения. Механические характеристики такого двигателя сходны с характеристиками двигателя последовательного возбуждения.

В зависимости от положения щеток ротор двигателя может вращаться как в сторону вращения поля, так и против поля.

Как и во всех асинхронных двигателях, в коллекторных двигателях переменного тока электрическая мощность, забираемая из сети, передается вращающимся полем на ротор. Часть этой мощности $P_{\text{эм}}(1 - s)$ преобразуется в механическую мощность. В асинхронных двигателях мощность $P_{\text{эм}}s$ преобразуется в тепло. В коллекторных двигателях переменного тока эта часть мощности через коллектор, преобразующий частоту скольжения в частоту сети, снова отдается в сеть. Таким образом, введение в конструкцию машины механического преобразователя частоты — коллектора обеспечивает экономичную работу машины за счет отдачи энергии скольжения в сеть.

Компенсированные трехфазные асинхронные двигатели. В этих машинах, являющихся разновидностью коллекторных машин параллельного возбуждения, дополнительная ЭДС $\Delta \dot{E}$ вводится в цепь ротора для регулирования коэффициента мощности. При этом коллекторная обмотка и коллектор рассчитываются на небольшую мощность. Компенсированные двигатели выполняются с питанием со стороны статора или ротора.

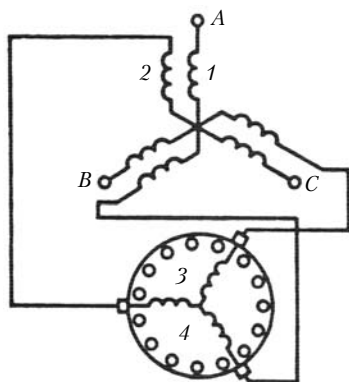


Рис. 6.7. Компенсированный трехфазный асинхронный двигатель с питанием со стороны статора

На рис. 6.7 представлена схема машины с питанием со стороны статора. На статоре расположены главная обмотка 1 и вспомогательная 2 с меньшим числом витков для питания коллекторной обмотки 3. На роторе, кроме коллекторной обмотки, в тех же пазах располагается фазная или короткозамкнутая обмотка 4 асинхронной машины.

Щетки на коллекторе устанавливаются таким образом, чтобы ЭДС $\Delta \dot{E}$ опережала ЭДС скольжения $s\dot{E}_2$.

При этих условиях намагничивающий ток компенсирует сдвиг фаз между U_1 и I_1 в первичной обмотке и машина может работать при $\cos \varphi_1 = 1$.

К. И. Шенфер предложил использовать в качестве вторичной обмотки массивный ротор с профрезерованными пазами, в которые укладывается коллекторная обмотка.

Схема компенсированного коллекторного двигателя с питанием со стороны ротора показана на рис. 6.8. На статоре имеется одна обмотка, соединенная с коллектором. На роторе располагаются две обмотки — главная и вспомогательная.

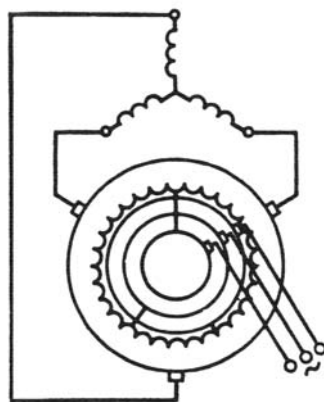


Рис. 6.8. Компенсированный коллекторный трехфазный двигатель с питанием со стороны ротора

Коллектор, как очевидно из рассмотренных выше схем электрических машин, вместе с подключенной к нему обмоткой может быть источником реактивной мощности. Компенсированные асинхронные машины могут работать с $\cos \varphi = 1$.

В начале XX в. ученые-электротехники представили десятки схем компенсированных коллекторных двигателей переменного тока. Одними из распространенных машин были явнополюсная трехфазная компенсированная коллекторная машина, предложенная А. Шербиусом, двигатель М. П. Костенко и Н. С. Япольского и др. [3].

Хотя трехфазные коллекторные машины в настоящее время находят небольшое применение, рабочие процессы в них имеют важное значение для понимания электромеханического преобразования энергии. В современных электроприводах широко применяются полупроводниковые преобразователи частоты, которые заменяют механический преобразователь частоты — коллектор. Знание коллекторных машин дает возможность лучше разобраться в работе полупроводниковых преобразователей совместно с электрическими машинами.

6.3. Однофазные коллекторные двигатели

Однофазные коллекторные двигатели широко применяются в бытовых электроприборах (полотерах, пылесосах, ручном инструменте, стиральных машинах и др.). Обычно их мощность не превышает сотен ватт, а частота вращения доходит до 30 000 об/мин.

Однофазные последовательные коллекторные двигатели (рис. 6.9) имеют сосредоточенную обмотку возбуждения ОВ, расположенную на явно выраженных полюсах и соединенную последовательно с многофазной обмоткой якоря Я, секции которой присоединены к коллектору. Для снижения потерь в стали статор и ротор выполняются шихтованными. Конструкция однофазных коллекторных двигателей сходна с конструкцией двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

В однофазных коллекторных двигателях последовательного возбуждения поток возбуждения Φ и ток i почти совпадают по фазе (рис. 6.10). Поэтому при изменении направления тока и потока электромагнитный момент имеет небольшую отрицательную часть, а средний момент в двигателе тем больше, чем меньше сдвиг по фазе между i и Φ . Так как последовательная обмотка возбуждения имеет малое число витков, ее индуктивное сопротивление небольшое. Однофазные коллекторные двигатели параллельного возбуждения не находят применения, поскольку обмотка возбуждения с большим числом витков имеет большое индуктивное сопротивление.

Для однофазного коллекторного двигателя можно записать следующее уравнение:

$$\dot{U} = \dot{E} + r\dot{I} + jx\dot{I}, \quad (6.1)$$

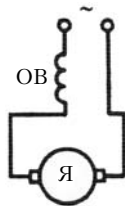


Рис. 6.9. Однофазный коллекторный двигатель последовательного возбуждения

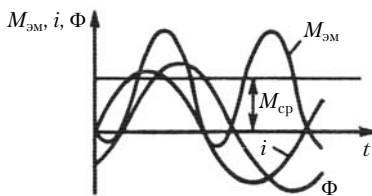


Рис. 6.10. Электромагнитный момент в коллекторных двигателях

где $x = x_a + x_b$ — сумма индуктивных сопротивлений якоря и обмотки возбуждения; r — активное сопротивление обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Уравнение (6.1) отличается от уравнения напряжения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения наличием члена $jx\dot{I}$.

Для уравнения (6.1) может быть построена векторная диаграмма (рис. 6.11). У однофазных коллекторных двигателей $\cos \varphi \approx 0,7 \div 0,95$. Механические характеристики сходны с механическими характеристиками двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Регулирование частоты вращения осуществляется путем изменения подводимого напряжения или шунтирования обмотки возбуждения или якоря.

В коммутируемых секциях обмотки якоря наводится реактивная ЭДС e_r и трансформаторная ЭДС e_t . Реактивная ЭДС зависит от частоты вращения и нагрузки. Трансформаторная ЭДС наводится в коммутируемой секции за счет изменения потока. Трансформаторная и реактивная ЭДС сдвинуты на 90° . Наличие трансформаторной ЭДС ухудшает коммутацию коллекторных двигателей переменного тока.

Двигатели небольшой мощности выполняются без добавочных полюсов. Для улучшения коммутации коллекторные двигатели выполняются с компенсационной обмоткой КО и добавочными полюсами ДП (рис. 6.12). Добавочные полюсы в коллекторных машинах не могут скомпенсировать e_r и e_t во всех режимах работы, и коммутация в коллекторных двигателях переменного тока хуже, чем в машинах постоянного тока.

Компенсационная обмотка уменьшает индуктивное сопротивление машины, так как она компенсирует поток реакции якоря и уменьшает потокоцепление. Уменьшение

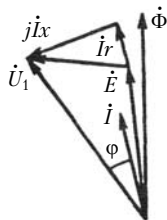


Рис. 6.11. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя

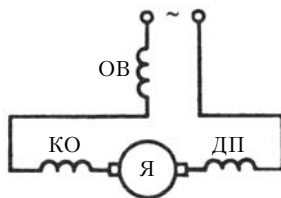


Рис. 6.12. Коллекторный двигатель с компенсационной обмоткой и добавочными полюсами

индуктивного сопротивления двигателя приводит к повышению $\cos \varphi$.

В двигателях небольшой мощности компенсационная обмотка — сосредоточенная, а в двигателях большой мощности — распределенная.

Мощные коллекторные двигатели мощностью до 1500 кВт применяются в качестве тяговых в ряде западноевропейских стран. При этом частота переменного тока $16^{2/3}$ или 25 Гц. В нашей стране электротяга осуществляется на постоянном и переменном токе. На железных дорогах, электрифицированных на переменном токе 25÷30 кВ, на электровозах устанавливаются понижающие трансформаторы и выпрямители, питающие тяговые двигатели постоянного тока.

Так как конструкции однофазных коллекторных двигателей и двигателей постоянного тока последовательного возбуждения близки друг к другу, выпускаются универсальные коллекторные двигатели, которые могут работать на переменном и постоянном токе. Для получения примерно тех же характеристик на постоянном и переменном токе необходимо переключить отпайки на обмотке возбуждения. При работе на переменном токе при одинаковых питающих напряжениях надо уменьшить число витков обмотки возбуждения.

Коллекторные двигатели переменного тока, как и двигатели постоянного тока, являются источником радиопомех. Для уменьшения последних обмотка возбуждения делится на две части и конденсаторы включаются между выводными концами и корпусом (см. рис. 5.45).

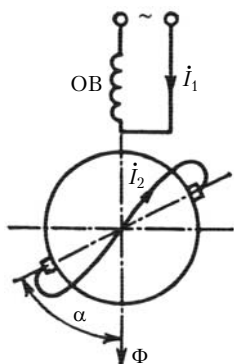


Рис. 6.13. Репульсионный двигатель

Репульсионные двигатели — это однофазные коллекторные двигатели, в которых обмотка якоря не имеет электрической связи с обмоткой возбуждения, а энергия на ротор передается трансформаторным путем (рис. 6.13). Регулирование частоты вращения производится поворотом щеток. Репульсионные двигатели строились на мощности в несколько десятков киловатт.

При $\alpha = 0$, когда ось щеток совпадает с направлением потока Φ , в ядре наводится максимальный ток i_2 , но момент равен нулю, так как прямое и обратное поля в воздушном зазоре созда-

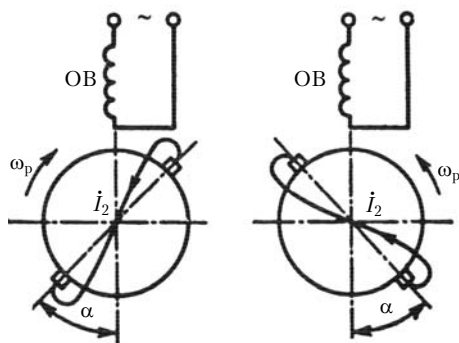


Рис. 6.14. Связь направления вращения репульсионного двигателя с положением щеток

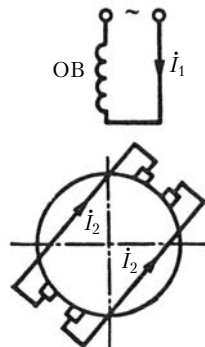


Рис. 6.15. Репульсионный двигатель с двойным комплектом щеток

ют одинаковые момент и $n = 0$. При $\alpha = 90^\circ$ ток в якоре $\dot{I}_2 = 0$ и момент также равен нулю. При угле $\alpha \neq 0$ и $\alpha \neq 90^\circ$ репульсионный двигатель развивает момент. Номинальный момент двигатель развивает при $\alpha = 15 \div 25^\circ$. В зависимости от смещения щеток к оси потока ротор двигателя вращается по часовой стрелке или против часовой стрелки (рис. 6.14).

Репульсионные двигатели выполняются с двойным комплектом щеток (рис. 6.15). Двойной комплект щеток позволяет уменьшить ток \dot{I}_2 под щеткой, а также более плавно регулировать частоту вращения. Щетки могут поворачиваться одновременно или одна пара щеток неподвижная, а другая — поворачивается. Репульсионные двигатели с двойным комплектом щеток изготавливаются на бóльшую мощность, чем с одним комплектом щеток.

В репульсионных двигателях применяется компенсационная обмотка, которая соединяется последовательно с обмоткой возбуждения. Добавочные полюсы в репульсионных двигателях не применяются, так как ось щеток перемещается.

Краткое рассмотрение коллекторных двигателей переменного тока демонстрирует их богатые возможности применения и расширяет представления об электромеханическом преобразовании энергии.

Глава 7

КАСКАДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

7.1. Каскадные соединения асинхронной машины с коллекторными машинами

Коллекторные машины позволяют регулировать амплитуду и фазу ЭДС ΔE , вводимую в цепь ротора асинхронной машины, и экономично регулировать частоту вращения и $\cos \varphi$ асинхронного двигателя. Соединение асинхронной машины с коллекторной машиной называют каскадным, поскольку электрические и механические цепи соединяются, образуя две ступени (два каскада) в единой схеме электромеханического преобразования энергии. При этом асинхронная машина имеет большую мощность и называется главной машиной, а коллекторная рассчитывается на меньшую мощность, зависящую от пределов изменения частоты вращения, и называется вспомогательной.

Различают два вида каскадов — *электромеханические* и *электрические*. В электромеханических каскадах ротор главной машины имеет механическую и электрическую связь с вспомогательной машиной. В электрических каскадах ротор главной машины имеет только электрическую связь с вспомогательной машиной.

Для регулирования реактивной мощности, потребляемой из сети асинхронным двигателем, применяется каскад с возбудителем Леблана — Шербиуса (рис. 7.1). Асинхронный двигатель с фазным ротором АД присоединен к сети U_1, f_1 . Обмотка ротора через щетки и кольца присоединена к возбудителю ВК, имеющему коллектор и три щетки. Возбудитель вращается приводным двигателем Д. С коллектора возбудителя снимается ЭДС ΔE , которая вводится с опережением в цепь ротора, $\cos \varphi$ двигателя при этом улучшается.

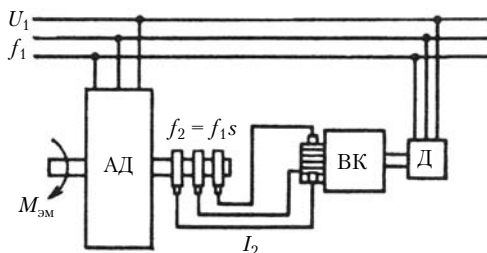


Рис. 7.1. Каскад с возбудителем Леблана – Шербиуса

Возбудитель не связан механически с асинхронным двигателем, поэтому этот каскад электрический.

Возбудитель Леблана – Шербиуса отличается от других машин тем, что он не имеет статора. В заглубленных пазах ротора укладывается двухслойная обмотка, секции которой выведены на коллектор (рис. 7.2). Ротор возбудителя удобно выполнять из двух частей: внутренней с открытыми пазами 1 и внешнего кольца 2, которое закрывает пазы.

Ток I_2 , замыкающийся в роторе асинхронного двигателя и возбудителя, создает в роторе возбудителя вращающееся поле, силовые линии которого замыкаются по стали ротора возбудителя (см. рис. 7.2). Частота вращения поля при неподвижном роторе возбудителя

$$n_0 = \frac{60f_1s}{p_b}, \quad (7.1)$$

где p_b — число пар полюсов возбудителя; s — скольжение асинхронного двигателя.

Если ротор возбудителя вращать, то частота на неподвижных щетках будет зависеть от n_0 и частоты вращения ротора возбудителя

$$s_b = \frac{n_0 \pm n_b}{n_0}, \quad (7.2)$$

где n_b — частота вращения ротора возбудителя.

При этом

$$\Delta \dot{E} = j \dot{I}_2 s_b x_{\text{кас}}, \quad (7.3)$$

где $x_{\text{кас}}$ — индуктивное сопротивление каскада, которое включает индуктивные сопротивления фазы асинхронного двигателя и возбудителя.

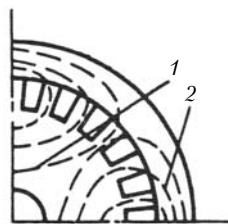


Рис. 7.2. Конструкция возбудителя Леблана – Шербиуса

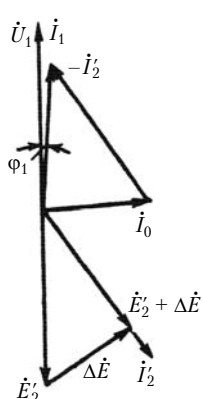


Рис. 7.3. Векторная диаграмма асинхронной машины в каскаде Леблана — Шербиуса

Такие каскады могут быть заменены синхронными двигателями.

Конструкции возбуждений весьма разнообразны. Одним из оригинальных является возбудитель Шербиуса — Лидаля. Он имеет статор с явно выраженными полюсами. На них размещена сосредоточенная трехфазная обмотка возбуждения. На якоре в пазах располагается многофазная обмотка, секции которой выведены на коллектор. Для улучшения коммутации на статоре располагается компенсационная обмотка. Электродвижущая сила на щетках якоря ΔE в зависимости от положения щеток может находиться в фазе или противофазе с E_2' . Таким образом, так же как и в каскаде с возбудителем Леблана — Шербиуса, можно регулировать $\cos \varphi$.

В каскадных соединениях применяются компенсированные и некомпенсированные преобразователи частоты для регулирования частоты вращения.

На рис. 7.4 показана схема электромеханического каскада основной асинхронной машины АД и коллекторной машины К. При частотах вращения ниже синхронной часть мощности

При $n_b > n_0$ ΔE опережает ток \dot{I}_2' и происходит компенсация сдвига фаз асинхронной машины, что иллюстрируется векторной диаграммой рис. 7.3. Ток в роторе \dot{I}_2' совпадает с результирующей ЭДС $\dot{E}_2' + \Delta E$, что приводит к смещению тока в статоре \dot{I}_1 и улучшению $\cos \varphi_1$. Как следует из векторной диаграммы, при достаточно большом ΔE возможна работа асинхронного двигателя с опережающим $\cos \varphi_1$. Для этого надо увеличивать габариты возбудителя. Возбудитель, который применяется для улучшения $\cos \varphi$, называется фазокомпенсатором. Недостатком таких каскадных схем является плохая коммутация щеток возбудителя. Та-

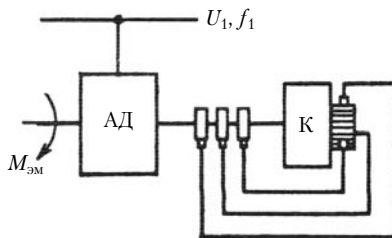


Рис. 7.4. Электромеханический каскад с коллекторной машиной

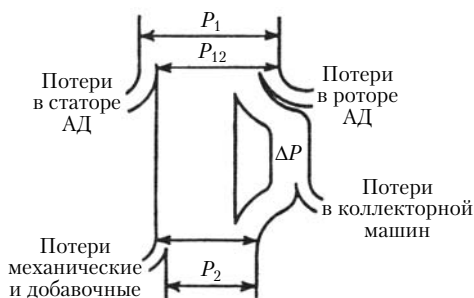


Рис. 7.5. Энергетическая диаграмма электромеханического каскада

ротора главной машины передается в виде электрической мощности коллекторной машине и преобразуется коллекторной машиной в механическую мощность. Таким образом, в электромеханических каскадах вся мощность, забираемая из сети, преобразуется в механическую мощность и в тепло (потери в основной и вспомогательной машинах).

Энергетическая диаграмма электромеханического каскада с коллекторной машиной представлена на рис. 7.5. Мощность в воздушном зазоре основной машины P_{12} равна мощности, забираемой из сети, минус потери в статоре АД. Мощность ΔP , передаваемая коллекторной машине за вычетом потерь в коллекторной машине, передается на общий вал. Полезная мощность, преобразуемая в механическую P_2 , складывается из мощности основной машины и коллекторной.

Момент вращения каскада

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{а,д}} \pm M_{\text{к}}, \quad (7.4)$$

где $M_{\text{а,д}}$ — момент основной машины; $M_{\text{к}}$ — момент коллекторной машины.

Знак «+» соответствует работе коллекторной машины в режиме двигателя, знак «−» — в режиме генератора.

С помощью каскадных схем регулируют частоту вращения. Чтобы изменить скольжение на Δs_1 , необходимо вводить значение $\Delta \dot{E}$, пропорциональное требуемому изменению скольжения. Известны десятки каскадных схем, обеспечивающих экономичное регулирование частоты вращения и $\cos \varphi$.

В последние десятилетия в связи с развитием полупроводниковой техники механические преобразователи частоты заменяются тиристорными и транзисторными преобразователями частоты.

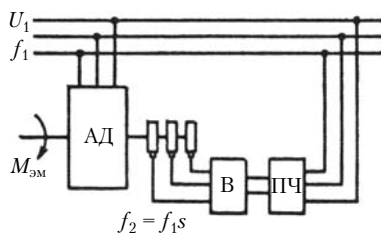


Рис. 7.6. Электромеханический каскад с полупроводниковым преобразователем

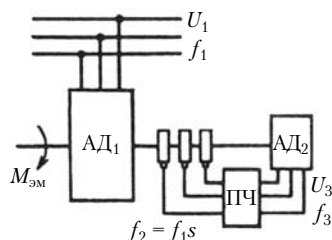


Рис. 7.7. Электромеханический каскад с вспомогательным асинхронным двигателем

На рис. 7.6–7.8 представлены принципиальные схемы электромашинных каскадных соединений с полупроводниковыми преобразователями частоты. Наиболее простая схема с рекуперацией энергии скольжения в сеть представлена на рис. 7.6. Энергия скольжения с частотой f_2 выпрямляется выпрямителем B в энергию постоянного тока, а затем преобразователем частоты преобразуется в частоту сети и через трансформатор возвращается в сеть. В этой схеме преобразователь имеет явно выраженный звено постоянного тока.

На рис. 7.7 дана принципиальная схема электромеханического каскада с основным асинхронным двигателем АД₁ и вспомогательным АД₂, который питается от преобразователя частоты напряжением U_3 и частотой f_3 . Преобразователь может иметь явно выраженный звено постоянного тока или работать в режиме преобразования частоты скольжения в частоту f_3 .

В электромеханическом каскаде с двигателем постоянного тока (ДПТ) мощность скольжения выпрямляется и постоянное напряжение подается на коллектор двигателя постоянного тока (рис. 7.8).

Каждая схема имеет свои преимущества и недостатки, и нельзя (так же как и в коллекторных каскадах) выбрать одну схему и этим ограничиться. Каскадные схемы не находят большого применения из-за высокой стоимости, больших

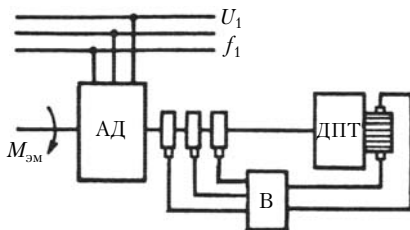


Рис. 7.8. Электромеханический каскад с двигателем постоянного тока

габаритов и массы полупроводниковых преобразователей частоты.

Каскадные схемы дают возможность в основном асинхронном двигателе работать с $\cos \varphi$, близким к единице, и обеспечивают экономичное регулирование частоты вращения.

7.2. Электромашинные преобразователи

Электрическую энергию одного вида можно преобразовать в электрическую энергию другого вида с помощью не только статических преобразователей (трансформаторов, полупроводниковых преобразователей), но и вращающихся электрических машин.

Электромашинные преобразователи состоят из двух машин, соединенных механически. В таком агрегате одна машина работает двигателем, а другая — генератором. Система двигатель — генератор, состоящая из двух машин постоянного тока, позволяет преобразовать постоянный ток одного напряжения в постоянный ток другого напряжения (рис. 7.9, *а*). С помощью двигателя постоянного тока и генератора переменного тока постоянный ток преобразуется в переменный ток (рис. 7.9, *б*). Если в режиме двигателя работает машина переменного тока, а в генераторном — машина постоянного тока, происходит преобразование переменного тока в постоянный (рис. 7.9, *в*). С помощью двух машин переменного тока преобразуется переменный ток одного напряжения и частоты в переменный ток другого напряжения, частоты и числа фаз (рис. 7.9, *г*).

Промышленностью выпускаются двухмашинные агрегаты для преобразования переменного тока в постоянный и обратно. Преимущество электромашинных преобразователей перед полупроводниковыми состоит в том, что они со-

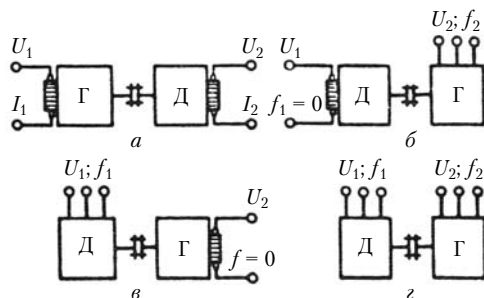


Рис. 7.9. Электромашинные преобразователи

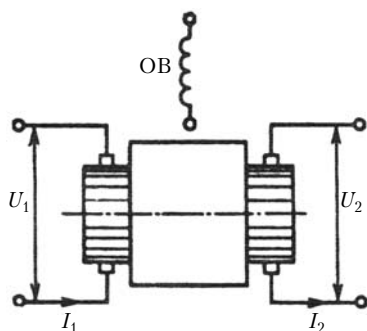


Рис. 7.10. Умформер

здают меньше высших гармоник и обеспечивают электропитание при кратковременных перерывах в питании на стороне двигателя. За счет кинетической энергии, накопленной во вращающихся частях, генератор может в течение некоторого времени отдавать энергию. Недостаток электромашинных агрегатов — сравнительно низкий КПД, равный произведению

КПД двигателя и генератора, и большие габариты.

Для уменьшения габаритов двухмашинных агрегатов в некоторых случаях целесообразно объединение двух агрегатов в один. При объединении двигателя постоянного тока и генератора постоянного тока (см. рис. 7.9, а) в пазы якоря укладываются две обмотки, которые выводятся на два коллектора (рис. 7.10). В одноякорный преобразователь входят общая обмотка возбуждения, магнитная система статора и общий корпус.

Такие машины применяются для преобразования низкого напряжения постоянного тока в высокое напряжение постоянного тока, например 24 В — в 600 В. Эти преобразователи получили название умформеров. В умформере между напряжениями U_1 и U_2 имеется жесткая связь, так как в машине имеется общий поток и общий якорь:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\left(\frac{pn}{60}\right) \left(\frac{N_1}{a_1}\right) \Phi}{\left(\frac{pn}{60}\right) \left(\frac{N_2}{a_2}\right) \Phi} = \frac{N_1 a_2}{N_2 a_1}, \quad (7.5)$$

где N_1 и N_2 — числа витков в первой и второй обмотках; a_1 и a_2 — числа параллельных ветвей первой и второй обмоток. Отношение (7.5) сходно с коэффициентом трансформации, и умформер работает как преобразователь — трансформатор с вращающимися обмотками. Момент, действующий на вал умформера, практически равен нулю, потому что момент машины, работающей в режиме двигателя, уравновешивается моментом генератора.

Направление токов в обмотках якоря встречное (как в трансформаторе), так как одна машина работает в режиме двигателя, а вторая — в режиме генератора. При объединении обмоток можно было бы получить снижение массы меди. Однако электрическая связь между коллекторами низшего и высшего напряжений недопустима. Если сделать напряжения на обоих коллекторах одинаковыми, то при совмещении обмоток якоря сечение общей обмотки будет стремиться к нулю, как в автотрансформаторе при коэффициенте трансформации, равном единице. Сечение обмотки будет определяться потерями в преобразователе. В идеальной машине без потерь теоретически сечение совмещенной обмотки равно нулю.

Совмещение машин переменного тока по схеме рис. 7.9, *а* не дает снижения массы активных материалов, так как потоки двух машин складываются, а электрическая связь между обмотками низшего и высшего напряжений недопустима. Совмещение машин по схемам рис. 7.9, *б* и *в* рассмотрено в параграфе 7.3.

Принципиально преобразование энергии в машине постоянного тока не изменится, если якорь и коллектор сделать неподвижными, а вращать обмотки возбуждения и щетки. Обычно из-за плохой коммутации вращающиеся щетки и неподвижный коллектор не применяются.

С помощью вращающихся щеток можно получить оригинальные преобразователи. В 1924 г. в Англии был построен преобразователь переменного тока в постоянный, в котором для выпрямления переменного тока использовались вращающиеся щетки. Трансвертер (так назвали его изобретатели) представляет собой обращенную машину постоянного тока (рис. 7.11). Отпайки вторичной обмотки шестифазного трансформатора присоединены к коллекторным пластинам, по которым скользят щетки. Коммутация происходит в момент, когда ЭДС в короткозамкнутой секции (двух соседних фазах трансформатора) близка к нулю. Щетки вращаются синхронным двигателем СД, мощность которого идет на покрытие потерь на трение на коллекторе. Постоянный ток снимается щетками с двух колец, присоединенных к щеткам, вращающимся по коллектору.

Трансвертер имел мощность 2000 кВт и преобразовывал переменное напряжение 6,6 кВ частотой 50 Гц в постоянное напряжение 100 кВ. Трансвертер состоял из шести трехфазных масляных трансформаторов, с помощью которых со-

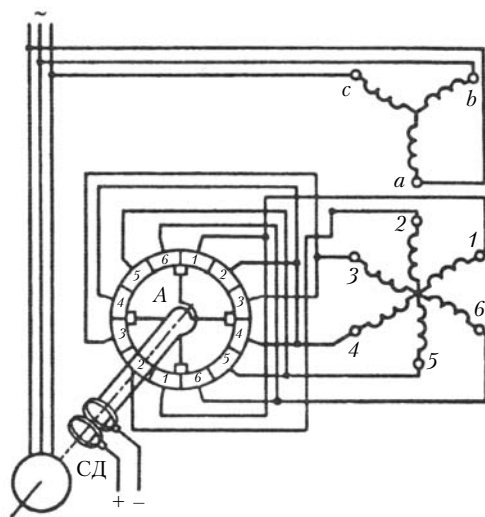


Рис. 7.11. Трансвертер

здавалась 36-фазная вторичная система обмоток, выведенная на восемь неподвижных коллекторов. С каждой щетки снималось напряжение 12 500 В.

В настоящее время преобразование переменного тока высшего напряжения в постоянный ток и обратно осуществляется полупроводниковыми преобразователями и трансформаторами.

7.3. Одноякорный преобразователь

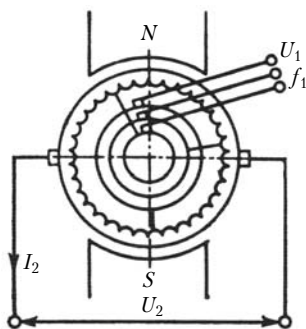


Рис. 7.12. Одноякорный преобразователь

В одноякорном преобразователе (рис. 7.12) объединены в один агрегат синхронный двигатель и генератор постоянного тока. В пазах якоря расположена двухслойная многофазная обмотка, секции которой выведены на коллектор, а с противоположной стороны от обмотки выведены на кольца в зависимости от числа фаз три или несколько отпаяк. Одноякорный преобразователь имеет общую магнитную систему и одну обмотку якоря.

Обычно он работает в режиме преобразования переменного тока в постоянный. Кольца одноякорного преобразователя присоединяются к сети переменного тока, со стороны переменного тока одноякорный преобразователь — обращенный синхронный двигатель с неподвижной обмоткой возбуждения и вращающейся обмоткой якоря, со стороны постоянного тока — одноякорный преобразователь — генератор постоянного тока.

Напряжение на выходе постоянного тока жестко связано с напряжением на стороне переменного тока, так как между коллектором и кольцами есть электрическая связь (см. рис. 7.12).

Соотношение между ЭДС на щетках E_2 и амплитудой ЭДС на кольцах определяется геометрическими соотношениями как отношение диаметра к хорде:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}}, \quad (7.6)$$

где m — число фаз, число отпаек от обмотки постоянного тока или число колец.

Форма кривой тока в секциях одноякорного преобразователя зависит от положения секции относительно щеток и колец, нагрузки и $\cos \varphi$ на стороне переменного тока.

На рис. 7.13, а, б показана форма тока в секции, находящейся на геометрической нейтрали, и в секции, находящейся

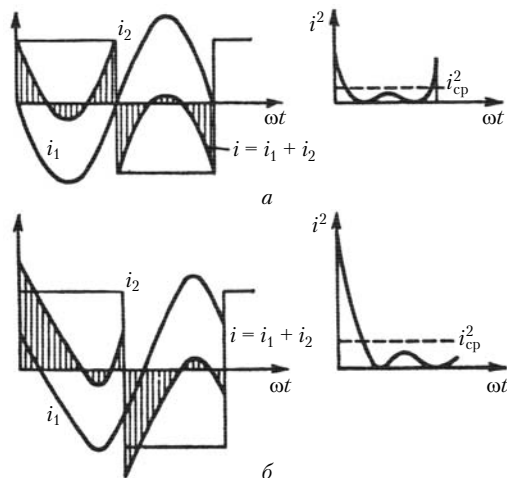


Рис. 7.13. Форма тока в секциях одноякорного преобразователя

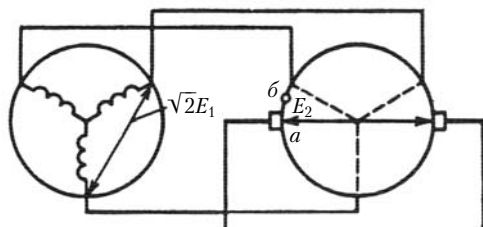


Рис. 7.14. Схема одноякорного преобразователя

ся между щеткой и кольцом. Положение секций показано на рис. 7.14. Ток в секции от машины постоянного тока i_2 изменяется по прямоугольному закону. Ток в секции от синхронного двигателя i_2 — синусоидальный. Так как одна машина работает в режиме двигателя, а другая — в режиме генератора, мгновенные значения результирующего тока i равны алгебраической сумме токов i_1 и i_2 (см. рис. 7.13). Смещение токов i_1 и i_2 зависит также от $\cos \varphi$, с которым работает синхронный двигатель.

На рис. 7.13, *a* и *б* представлены также зависимости i_2 от времени. При совмещении обмоток якоря двигателя и генератора обеспечивается снижение электрических потерь в якоре одноякорного преобразователя. Потери в меди якоря определяются $i_{\text{ср}}^2$ в секциях.

Характер коммутации в одноякорном преобразователе приближается к характеру коммутации в машине постоянного тока с компенсационной обмоткой. Для улучшения коммутации применяются дополнительные полюсы.

Пуск в ход одноякорного преобразователя осуществляется так же, как и синхронного двигателя. Наиболее распространен асинхронный пуск.

Чтобы регулировать напряжение на стороне постоянного тока, нужно изменять напряжение на кольцах. Для этого надо в силовую цепь включить реактор или автотрансформатор, что усложняет установку.

При изменении тока в обмотке возбуждения изменяется $\cos \varphi$. При недо возбуждении одноякорный преобразователь забирает из сети реактивную мощность. При перевозбуждении одноякорный преобразователь отдает в сеть реактивную мощность. При преобразовании постоянного тока в переменный одноякорный преобразователь работает как двигатель постоянного тока и синхронный генератор. При регулировании частоты вращения двигателя постоянного

тока изменяется частота на выходе синхронного генератора. Одноякорный преобразователь может работать в качестве генератора двойного тока, т.е. преобразовывать механическую энергию в электрическую энергию постоянного и переменного тока. В этом случае постоянный i_2 и переменный i_1 ток в якоре складываются и сечение обмотки

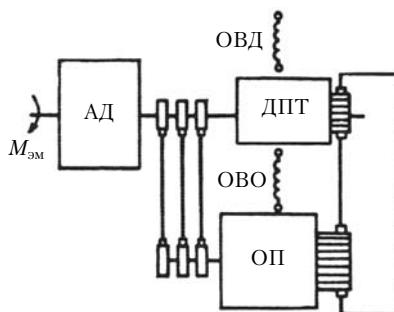


Рис. 7.15. Каскадная схема с одноякорным преобразователем

якоря необходимо увеличивать по сравнению с сечением обмотки при работе одноякорного преобразователя в качестве преобразователя.

Одноякорные преобразователи находят применение в каскадных схемах. В схеме рис. 7.15 энергия скольжения асинхронного двигателя АД преобразуется одноякорным преобразователем ОП в постоянный ток, который подается на двигатель постоянного тока ДПТ, находящийся на одном валу с асинхронным двигателем. Обмотки возбуждения двигателя ОВД и одноякорного преобразователя ОВО обеспечивают расширение пределов регулирования частоты вращения главного двигателя.

Рассмотрение электрических машин в начале книги мы начинали с обобщенной машины. Заканчиваем рассмотрение индуктивных машин одноякорным преобразователем, на базе которого может быть выполнена обобщенная машина. Одноякорный преобразователь может работать как синхронная, асинхронная и коллекторная машина, таким образом, изучая эту машину, можно изучать большинство электрических машин.

Глава 8

ЕМКОСТНЫЕ И ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

8.1. Емкостные электромеханические преобразователи

Электротехническая промышленность изготавливает только индуктивные машины. Теория индуктивных машин доведена до высокого совершенства, и почти весь объем данной книги посвящен машинам, в которых концентрация энергии происходит в магнитном поле.

В емкостных электромеханических преобразователях (ЭП) концентрация энергии и электромеханическое преобразование энергии происходят в электрическом поле. Хотя емкостные электрические машины появились значительно раньше индуктивных, до сих пор они как силовые ЭП практически не применяются.

В электротехнике существует теория дуально-инверсной электродинамики, которая утверждает, что уравнения электрического поля получаются из уравнений магнитного поля путем дуально-инверсной замены [7]

<i>Электрическое поле</i>		<i>Магнитное поле</i>
$Q_э$	\Leftrightarrow	$Q_м$
Электрический заряд		Магнитный заряд
$\Phi_э$	\Leftrightarrow	$\Phi_м$
Электрический поток		Магнитный поток
u	\Leftrightarrow	i
Напряжение		Ток
e	\Leftrightarrow	F
ЭДС		МДС

Использование представления о магнитном заряде дает возможность симметризовать уравнения электромагнитного поля.

Теория емкостных машин, несмотря на усилия многих талантливых ученых, не получила глубокого развития. Поэтому целесообразно перенести достижения в области теории индуктивных машин на емкостные электрические машины.

Для индуктивных электрических машин ЭДС

$$e = Blv, \quad (8.1)$$

а для емкостных машин МДС

$$h = Dlv, \quad (8.2)$$

где D — индукция электрического поля или электрическое смещение; l — длина проводника в индуктивных машинах и ширина электрода в емкостных электрических машинах.

В индуктивных машинах электромеханическое преобразование энергии происходит за счет изменения индуктивностей, напряжений и токов, а в емкостных машинах — за счет изменения емкостей, напряжений и токов. Энергия электрического поля

$$W_э = 0,5 \int_v EDdv, \quad (8.3)$$

где E — напряженность электрического поля.

Чтобы создать емкостную электрическую машину, надо сконцентрировать энергию электрического поля. Если сконцентрировать энергию электрического поля в вакууме или воздухе, то степень концентрации энергии будет значительно ниже концентрации энергии магнитного поля и создать электрическую емкостную машину, способную конкурировать с индуктивной машиной, не удастся.

Изменять емкость можно, изменяя площадь пластин конденсатора S , расстояние между пластинами x и диэлектрическую постоянную вещества ε , находящегося между пластинами:

$$C = \frac{\varepsilon S}{x}. \quad (8.4)$$

Пренебрегая потерями, силу, возникающую при изменении емкости за счет изменения x , можно определить как

$$F = \frac{d(W_n - W_э)}{dx}, \quad (8.5)$$

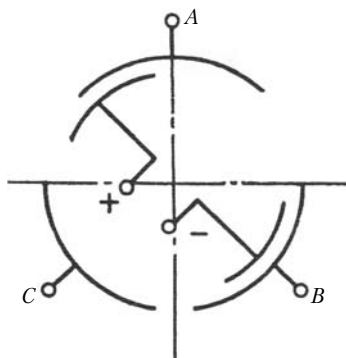
где W_n — энергия, доставляемая источником;

$$dW_{\text{и}} = U dQ = U^2 dC, \quad (8.6)$$

здесь Q — заряд на конденсаторе;

$$dQ = CdU.$$

Включая и отключая конденсатор от сети, можно обеспечить направление мощности из сети или отдавать ее в сеть.



**Рис. 8.1. Трехфазное
вращающееся
электрическое поле**

Располагая определенным образом пластины конденсатора в пространстве и сдвигая напряжение во времени, можно, как и для магнитного поля, получить вращающееся электрическое поле (рис. 8.1). Из трехфазной системы можно получить многофазные и двухфазные емкостные электрические машины.

Емкостные ЭП, как и индуктивные, делятся на синхронные, асинхронные, коллекторные ЭП и трансформаторы.

В синхронной емкостной машине $\omega_p = \omega_c$. Для этого достаточно на электроды ротора подать постоянное напряжение (см. рис. 8.1). Чтобы получить асинхронную емкостную машину ($\omega_p \neq \omega_c$), надо в синхронной машине заменить ротор, выполнив его в виде цилиндра из диэлектрика.

Емкостные трансформаторы получаются, если напряжение на конденсаторах изменяется. Напряжение в емкостных машинах изменяется, если при постоянном заряде Q

изменять емкость конденсатора $C = \frac{Q}{U}$. Если к обкладкам конденсаторов A, B, C подводить напряжения от коммутатора (коллектора), можно получить коллекторные емкостные электрические машины. Так же как для индуктивных машин, можно ввести представление об обобщенной емкостной электрической машине, которая получается из обобщенной машины (см. рис. 1.25), если в ней индуктивности заменить на емкости. На основе теории дуально-инверсной электродинамики для обобщенной емкостной электрической машины из уравнений (1.100), (1.106) записываются уравнения:

$$\begin{pmatrix} i_{\alpha}^s \\ i_{\alpha}^r \\ i_{\beta}^r \\ i_{\beta}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{\alpha}^s + \frac{d}{dt}C_{\alpha}^s & \frac{d}{dt}C & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}C & g_{\alpha}^r + \frac{d}{dt}C_{\alpha}^r & C_{\beta}^r\omega_p & C\omega_p \\ -C\omega_p & C_{\alpha}^r\omega_p & g_{\beta}^r + \frac{d}{dt}C_{\beta}^r & \frac{d}{dt}C \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt}C & g_{\beta}^s + \frac{d}{dt}C_{\beta}^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_{\alpha}^s \\ u_{\alpha}^r \\ u_{\beta}^r \\ u_{\beta}^s \end{pmatrix}, \quad (8.7)$$

$$M_{\text{эм}} = C(u_{\beta}^s u_{\alpha}^r - u_{\alpha}^s u_{\beta}^r). \quad (8.8)$$

В уравнениях (8.7), (8.8) по отношению к уравнениям индуктивной машины произведены следующие дуально-инверсные замены: напряжение — ток, $u \rightleftharpoons i$; индуктивности — полные емкости, $L_{\alpha,\beta}^{sr} \rightleftharpoons C_{\alpha,\beta}^{sr}$; взаимная индуктивность — взаимная емкость, $M \rightleftharpoons C$; активные сопротивления — проводимости, $r_{\alpha,\beta}^{sr} \rightleftharpoons g_{\alpha,\beta}^{sr}$.

Полные емкости включают емкость и собственную емкость, например

$$C_{\alpha}^s = C + C_{c\alpha}^s. \quad (8.9)$$

Уравнения емкостной машины могут быть записаны в различных системах координат и повторять все многообразие уравнений индуктивных электромеханических преобразователей.

При создании емкостных электрических машин было бы ошибкой копирование конструкций индуктивных машин. Индуктивные машины с вращательным движением ротора настолько совершенны, что заменить их чем-то другим невозможно. Надо пытаться найти конструкции емкостных машин, непохожие на индуктивные, и применить их там, где индуктивные машины не дают удачных решений, например для получения возвратно-поступательного движения, для ЭП с жидким и газообразным ротором и др.

Чтобы получить емкостные машины, по своим показателям приближающиеся к индуктивным электрическим машинам, надо электрическое поле концентрировать в веществе с большой диэлектрической постоянной ϵ . Применять в конструкции диэлектрики $\epsilon \approx 8 \div 10\,000$, такие как титанат бария, дигидрофосфат калия и др. Если в индуктивных машинах энергия магнитного поля концентрировалась в воздушном зазоре, то в емкостных машинах она должна концентрироваться в жидких или твердых диэлектриках.

Одним из примеров емкостной машины может служить ЭП, использующий пьезоэффект. При механических воздействиях на кристаллы кварца, титаната бария, сегнетовой соли на их гранях возникают электрические заряды противоположных знаков. Это явление называют пьезоэффектом. При воздействии на кристалл электрического поля возникают механические деформации. Это явление называют обратным пьезоэффектом.

Пьезокерамические ЭП могут использоваться как генераторы для получения высоких напряжений и как двигатели для получения линейных перемещений. Хотя перемещения эти в одном кристалле ничтожны, соединяя кристаллы последовательно, можно получить точные высокочастотные перемещения рабочих органов. Пьезокерамические ЭП в качестве генераторов пытаются использовать в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания.

Пьезометрические ЭП, хотя и не похожи на обычные электрические машины, описываются уравнениями электромеханического преобразования энергии и подчиняются законам электромеханики.

За более чем трехвековую историю развития емкостных электрических машин наиболее удачной конструкцией является конвекционный генератор Ван-де-Граафа (рис. 8.2). В этой машине в заряжающей системе 1 за счет коронного разряда происходит разделение зарядов на положительные и отрицательные. Отрицательные заряды движущейся лентой 2 переносятся к сфере 3 и снимаются с ленты щеткой 4.

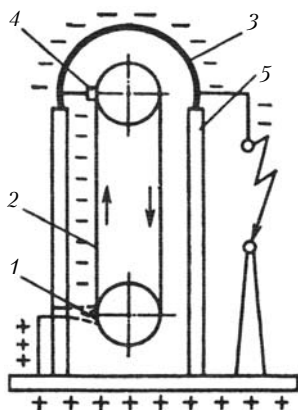


Рис. 8.2. Конвекционный генератор Ван-де-Граафа

Металлическая сфера 3 установлена на изоляционной подставке 5. Мощность такого генератора 6 кВт, напряжение постоянного тока 15 млн В, ток 1000 мА. Высота генератора 15÷20 м. Такие генераторы применяются в испытательных установках.

Перспективной конструкцией емкостной машины является ионный двигатель, принципиальная схема которого показана на рис. 8.3. Поток ионов ускоряется в канале электрическим полем и выбрасыва-

ется из сопла с разностью скоростей $v_1 - v_2$, за счет этого корпус двигателя получает ускорение.

Преимущество емкостных машин перед индуктивными состоит в том, что они не требуют массивной магнитной системы. Для создания электрического поля нужны легкие электроды. Емкостные двигатели — высоковольтные, и это их преимущество и недостаток.

Как в области теории, так и в практической реализации емкостных электрических машин сделано еще очень мало, но имеются большие перспективы и электромеханики должны пытаться применять емкостные ЭП, когда обычные электрические машины не обеспечивают необходимых показателей.

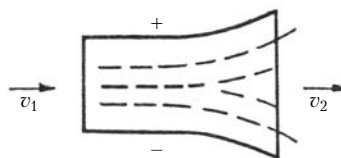


Рис. 8.3. Схема ионного двигателя

8.2. Индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи

В индуктивных ЭП концентрация и преобразование энергии происходят в магнитном поле, а в емкостных — в электрическом поле. В индуктивно-емкостных ЭП концентрация и преобразование энергии происходят в электромагнитном поле.

Индуктивно-емкостный ЭП можно получить, если совместить в одном агрегате индуктивную и емкостную электрическую машину. Примером индуктивно-емкостного ЭП является машина, показанная на рис. 8.4. Простейшая индуктивная машина L соединена механически и имеет общую электрическую цепь с емкостной электрической машиной C . Индуктивная машина состоит из катушки 1, возбуждаемой постоянным током, и подвижного сердечника 2, соединенного с коромыслом 3. При движении сердечника изме-

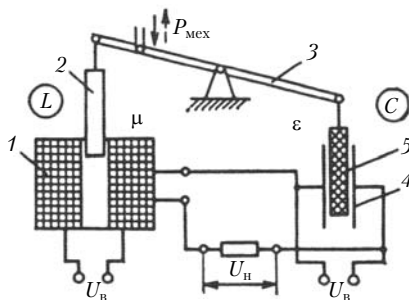


Рис. 8.4. Схема индуктивно-емкостного электромеханического преобразователя

няется индуктивность катушки и в цепи нагрузки, состоящей из нагрузочного сопротивления z_n , катушки 1 и конденсатора переменной емкости 4, протекает переменный ток.

Емкостная машина представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется за счет того, что между обкладками перемещается диэлектрик 5 с большой диэлектрической постоянной ε . При изменении емкости C изменяется

ток в электрической цепи $i = \frac{dq}{dt}$, где q — заряд цепи. При настройке обеих машин в резонанс, когда $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и $\omega L_0 = \frac{1}{\omega_0 C}$,

имеет место электромеханический резонанс. При этом частоты механических и электрических колебаний равны друг другу. При резонансе энергетические характеристики машины наилучшие. Для создания магнитного и электрического полей в этой машине не требуется реактивная мощность от постороннего источника, при резонансе происходит обмен реактивной мощностью между индуктивной и емкостной машинами. В зависимости от характера нагрузки следует учитывать и реактивную мощность нагрузки. Индуктивно-емкостный электромеханический преобразователь, как и все электрические машины, обратим: он может работать в режиме генератора и двигателя. В генераторном режиме к коромыслу прикладывается механическая мощность $P_{\text{мех}}$, а в нагрузке выделяется электрическая мощность $I_n^2 R_n$ (где I_n — ток в нагрузке, R_n — активное сопротивление нагрузки). Подводя электрическую мощность к выводам z_n , с коромысла 3 снимаем механическую мощность.

Индуктивно-емкостный ЭП можно создать, используя магнитострикционный и пьезоэлектрический эффекты.

Явление магнитострикции связано с изменением формы и размеров ферромагнетика при его намагничивании. При механических воздействиях на ферромагнетик возникает намагниченность. Пьезоэффект связан с возникновением электрических зарядов при механических воздействиях на кристаллы. Существует обратный пьезоэлектрический эффект, когда под действием электрического поля происходит изменение линейных размеров кристаллов.

На рис. 8.5 дана схема индуктивно-емкостного ЭП, который состоит из магнитострикционной 1 и пьезоэлектрической 2 частей, которые укреплены на недеформируемой опоре. Материалами с наилучшими пьезосвойствами явля-

ются твердый раствор цирконатотитаната свинца, титанат бария, сегнетова соль и др. В качестве магнитострикционного материала используются пермендюр, чистый никель, твердый раствор цирконатотитаната свинца и др.

При механическом воздействии на пьезокристалл на его гранях возникает ЭДС и в электрической цепи протекает ток, который создает магнитное поле, воздействующее на магнитострикционную часть. Настроивая в резонанс электрическую цепь и механические колебания, можно получить индуктивно-емкостный ЭП колебательного движения с высокими энергетическими показателями. Соединяя последовательно десятки и сотни кристаллов, можно создать ЭП возвратно-поступательного движения с точными перемещениями в трехмерном пространстве. Такой ЭП способен работать в двигательном и генераторном режимах и может найти применение в робототехнике. Хотя рассмотренные ЭП не имеют сходства с обычными электрическими машинами, они подчиняются законам электромеханики и процессы преобразования энергии в этих машинах подчиняются уравнениям электромеханического преобразования энергии.

Математическое описание процессов преобразования энергии в индуктивно-емкостных ЭП состоит из системы уравнений индуктивной и емкостной машин, которые в символической форме могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} \mathbf{u}_L \\ \mathbf{i}_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z}_L & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_C \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \mathbf{i}_L \\ \mathbf{u}_C \end{vmatrix}, \quad (8.10)$$

$$M_{\text{эм}L} = M(I^s I^r); \quad M_{\text{эм}C} = C(U^s U^r), \quad (8.11)$$

где $\mathbf{u}_L, \mathbf{i}_L$ — соответственно субматрицы напряжений и токов индуктивной машины; $\mathbf{i}_C, \mathbf{u}_C$ — субматрицы токов и напряжений емкостной электрической машины; \mathbf{Z}_L — матрица сопротивлений индуктивной машины; \mathbf{Z}_C — матрица сопротивлений емкостной машины; $M_{\text{эм}L}, M_{\text{эм}C}$ — электромагнитные моменты индуктивной и емкостной машин; I^s, I^r — токи в статоре

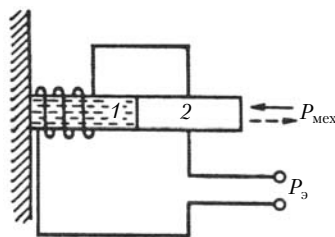


Рис. 8.5. Индуктивно-емкостный электромеханический преобразователь с магнитострикционной и пьезоэлектрической частями

и роторе индуктивной машины; U^s , U^r — напряжения в неподвижной и перемещающейся частях емкостной машины.

Субматрицы напряжений и токов и матрицы сопротивлений индуктивной и емкостной машин могут иметь все видоизменения, рассматриваемые в теории индуктивных машин. Уравнения момента (8.11) могут иметь также все видоизменения.

Система уравнений (8.10), (8.11) описывает поведение индуктивно-емкостных ЭП в переходных и установившихся режимах. При нелинейной связи между индуктивной и емкостной машинами в уравнениях (8.10) вместо нулей появляются взаимные связи \mathbf{Z}_{Lc} и \mathbf{Z}_{cL} , учитывающие влияние одной машины на другую.

Индуктивно-емкостные ЭП еще не нашли технических применений. Однако наличие математического описания процессов преобразования энергии в таких машинах, богатый опыт создания и применения индуктивных машин позволяют рассчитывать на то, что в недалеком будущем новые электрические машины найдут оригинальные применения.

При дальнейшем развитии теории электрических машин, по-видимому, удастся глубоко исследовать уравнения индуктивно-емкостных машин и с них начинать изучение электрических машин как с наиболее общих уравнений, из которых в частном случае получаются уравнения индуктивных и емкостных электрических машин.

8.3. Биодвигатели

Природа отвела емкостным электромеханическим преобразователям самое почетное место — они являются основными преобразователями энергии в живых организмах.

За прошедшие два века электробиология сделала поразительные успехи, но только всего несколько десятилетий назад биологи доказали, что движение бактерий может осуществляться, минуя превращение энергии пищи в АТФ (аденозинитрифосфорную кислоту). За счет мембранного потенциала, образующегося в результате разделения зарядов, в биологических двигателях электрическая энергия преобразуется в механическую. При этом АТФ является лишь накопителем и переносчиком зарядов.

Биопотенциалы возникают в клеточных мембранах, которые могут пропускать положительные ионы, но не пропускают анионы. Вначале отрицательные и положительные заряды, которые появляются в клетке за счет переварива-

ния питательных веществ, компенсируют друг друга. Затем часть ионов проникает через полупроницаемую мембрану и снаружи положительных ионов становится больше, чем внутри. На мембране возникает нернстовский потенциал. В. Нернст опубликовал свою диссертацию, в которой излагалась теория мембранного потенциала, в 1889 г. Наиболее полно мембранная теория возникновения электричества в живых организмах изложена в книге Ю. Бернштейна «Электробиология», вышедшей в свет в 1912 г.

Одиночная клетка обладает потенциалом покоя 60 мВ, при возбуждении потенциал увеличивается вдвое. Клетки могут соединяться и последовательно, и параллельно. У электрического угря последовательно соединяется более 6000 клеток, и он может создавать напряжение $800 \div 900$ В.

Для морских электрических рыб важно получать не только высокое напряжение, но и большой ток. Электрический скат дает напряжение 50 В и ток 50 А. У него смешанное соединение клеток (400 соединены последовательно и 500 — параллельно). Электрический скат или электрический угорь при разрядах генерируют значительную мощность — до 6 кВт в импульсе продолжительностью 2–3 мс [7].

Разделенные в генераторах заряды АТФ передвигаются к биодвигателям. Линиями электропередачи могут быть кровеносные сосуды, а в простейших организмах — межклеточная жидкость.

Схема одного из биодвигателей — натрий-калиевого насоса — дана на рис. 8.6, а. Этот биологический двигатель состоит из ротора — белка с активными центрами 7, который захватывает из наружной среды 2 ион калия, а из внутренней (цитоплазмы клетки 3) — ион натрия. Ротор (белковая молекула) вращается в мембране 4 и освобождает захваченные ионы. При этом натрий выходит наружу, а калий попадает внутрь клетки (см. рис. 8.6, а).

На роторе укреплен ворсинка, которая, как корабельный винт, преобразует вращательное движение в поступательное. Бактерия может иметь более десятка ворсинок, которые обеспечивают перемещение в трехмерном пространстве. Бактерии — первые электромеханические преобразователи на Земле. У них есть генераторы (клеточные мембраны), двигатели и линии передачи электроэнергии. Генераторы и двигатели управляются из одного центра. Как и на современной электростанции топливо, сгорая, отдает тепловую и механическую энергии электрическим генераторам, так

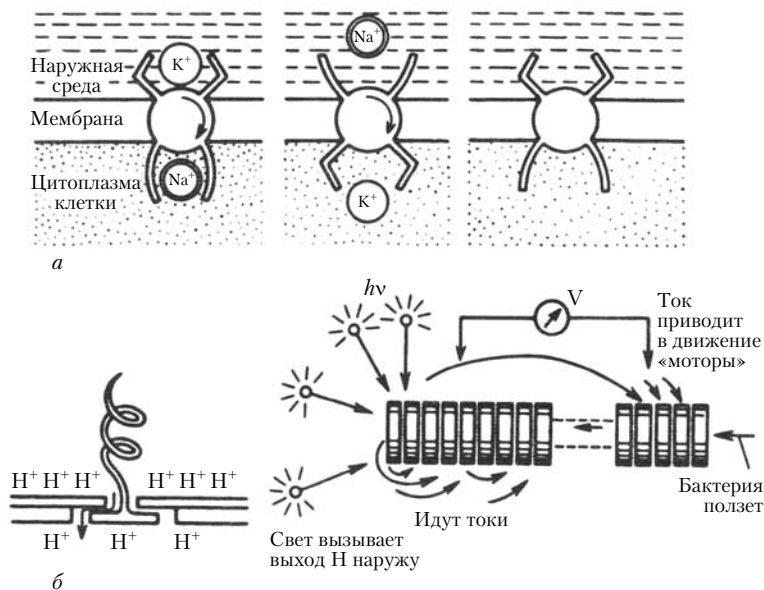


Рис. 8.6. Биодвигатели:

а — натрий-калиевый насос; б — линейные

и энергия пищи в биоэнергетиках преобразуется в электрическую энергию. В биодвигателях электрическая энергия преобразуется в механическую энергию и тепло.

В биологических организмах широко распространено поступательное движение. На рис. 8.6, б представлена схема линейного двигателя цианобактерии, состоящего из множества (1, 2, 3, ..., n) колонок, которые под действием зарядов могут сжиматься и расширяться. За счет периодических гармонических деформаций колонок бактерия ползет, при этом электрическая энергия преобразуется в механическую. Нетрудно вспомнить гусениц, которые имеют присоски на множестве колонок, и огромных змей. В процессе эволюции из присосок образовались конечности, и появились сороконожки и другие насекомые.

Далее, в результате эволюции за миллиарды лет появилось бесчисленное множество разнообразных живых организмов, вершиной которых стал человек — высшее достижение природы, умеющее думать и создавать как произведения искусства, так и сложнейшие технические устройства.

Рассмотренные принципы электромеханического преобразования энергии имеют место как в растениях, так и в дру-

гих живых организмах. Растения получают пищу за счет перемещения относительно них среды обитания (воды или воздуха), а животные в поисках пищи вынуждены сами перемещаться в среде обитания [7].

Как следует из истории развития электромеханики и биологии, на первых этапах ими занимались одни и те же ученые. За двухсотлетнюю историю электромеханиками и электробиологами были сделаны фундаментальные открытия и достигнуты выдающиеся результаты научных исследований. Однако за это время ученые-электротехники и биологи так далеко разошлись, что сегодня нет специалистов, хорошо разбирающихся как в электробиологии, так и в электромеханике. Прогресс в развитии электробиологии в ближайшее время будет определяться внедрением в биологию достижений электромеханики, и снова потребуются профессионалы в обоих направлениях

Электромеханические преобразователи природа использует в живой и неживой природе. Если представить шкалу единичных мощностей электромеханических преобразователей от нуля до бесконечности и на ней выделить предпочтительные области, которые занимают индуктивные, емкостные и индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи, то емкостные будут занимать область от нуля до нескольких ватт, а индуктивные господствуют в области больших мощностей — от долей ватт до 10^{24} Вт и выше. Индуктивно-емкостные электромеханические преобразователи занимают среднее положение между индуктивными и емкостными преобразователями (см. рис. 1.14).

Безграничные просторы космоса, занятые огромными массами вещества, принадлежат магнитным полям и токам, где господствуют индуктивные электромеханические преобразователи [6, 5].

Многие считают, что в области теории и практики электромашиностроения все или почти все сделано. Однако электромеханика не пережила еще и начального своего этапа, а изучение целых двух классов электрических машин только начинается, и на этом пути молодых электромехаников ждут удивительные свершения.

Электромеханики только подошли к изучению и созданию на базе биологических двигателей электромеханических преобразователей, а геоэлектромеханика только приоткрывает возможности для создания космических наземных энергетических установок.

Список литературы

1. Антонов, М. В. Технология производства электрических машин / М. В. Антонов. — М. : Энергоатомиздат, 1993.
2. Бут, Д. А. Бесконтактные электрические машины / Д. А. Бут. — М. : Высшая школа, 1990.
3. История электротехники / под ред. И. А. Глебова. — М. : изд-во МЭИ (ТУ), 1999.
4. Копылов, И. П. Гелиоэлектромеханика / И. П. Копылов. — М. : изд-во МЭИ, 2002.
5. Копылов, И. П. Геоэлектромеханика / И. П. Копылов. — М. : изд-во МЭИ, 2000.
6. Копылов, И. П. Космическая электромеханика / И. П. Копылов. — М. : изд-во МЭИ, 1998.
7. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. — М. : Высшая школа, 2001.
8. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. — М. : Высшая школа, 2004.
9. Осин, И. Л. Электрические машины. Синхронные машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян ; под ред. И. П. Копылова. — М. : Высшая школа, 1990.
10. Осин, И. Л. Электрические машины автоматических устройств / И. Л. Осин, Ф. М. Юферов. — М. : изд-во МЭИ, 2003.
11. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев ; под ред. И. П. Копылова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 2005.
12. Радин, В. И. Электрические машины: асинхронные машины / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович ; под ред. И. П. Копылова. — М. : Высшая школа, 1988.
13. Сборник Государственных стандартов (ГОСТ) : Е60, Е61, Е62, Е64, Е69.
14. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины. Трансформаторы / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова ; под ред. И. П. Копылова. — М. : Высшая школа, 1989.
15. Сипайлов, Г. А. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, Т. А. Хорьков. — М. : Высшая школа, 1987.
16. Специальные электрические машины. Источники и преобразователи энергии. В 2 кн. / А. И. Бертинов, Д. А. Бут, С. Р. Ми-

журин [и др.] ; под ред. Б. Л. Алиевского. — М. : Энергоатомиздат, 1993.

17. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. — М. : Энергоатомиздат, 1988—1989.

18. *Токарев, Б. Ф.* Электрические машины / Б. Ф. Токарев. — М. : Энергоатомиздат, 1990.

19. Электротехнический справочник : В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова [и др.] ; гл. ред. И. Н. Орлов. — М. : изд-во МЭИ, 1998.

Предметный указатель

- Автомат гашения поля 504
– повторного включения 506
Автотрансформатор 150, 213
Амплидин 609
Апериодический ток короткого замыкания синхронной машины 501
Асинхронизированная синхронная машина 527
Асинхронные моменты высших гармоник поля 327
Асинхронный генератор с самовозбуждением 575
– двигатель Бушера 361
– – дуговой 389
– – двухклеточный 333
– – конденсаторный 385
– – линейный 390
– – однофазный 380
– – с глубокими пазами на роторе 287, 333
– – – катящимся ротором 395
– – – короткозамкнутым ротором 285
– – – массивным ротором 337
– – – полым ротором 357
– – – фазным ротором 287
– – – экранированными полюсами 386
– – Шенфера 337
– тахогенератор 400
- Базисные величины в электрических машинах 90
Барабанные обмотки 85
Биодвигатели 664
Беличья клетка 287
Бесконтактные синхронные машины 518
Бесконтактный сельсин 401
- Векторная диаграмма автотрансформатора 156
– – асинхронного генератора 293
– – асинхронной машины 293
– – синхронной машины неявнополюсной 460
– – – явнополюсной 465
– – трансформатора 158
Вентильный двигатель 625
Вентиляция 127
Вихревые токи 332
Включение синхронных машин 471
– – методом самосинхронизации 471
– – на параллельную работу трансформаторов 204
Возбудитель индукционный 504
Волна МДС вращающаяся 68
Вращающееся магнитное поле 63
Вращающийся трансформатор 406
Высшие гармоники намагничивающего тока трансформатора 195
– МДС трехфазной обмотки переменного тока 102
- Газовое реле 189
Гашение магнитного поля возбуждения 503
Генератор поперечного поля 615
– постоянного тока 585
– – сварочный 614
– – с тремя щетками 613
– – – расщепленными полюсами 613
– – – униполярный 615
Геометрическое место токов асинхронной машины 311
Геоэлектромеханика 618
Гидрогенератор 415, 430
– капсульный 431
Гистерезисный момент 329, 526
Главное индуктивное сопротивление обмотки 294, 449

- Группы соединений трансформатора 189
- Двигатель гистерезисный 526
- для детских игрушек 623
 - коллекторный компенсированный 639
- Двигатель коллекторный однофазный 640
- – репульсионный 642
 - – универсальный 642
 - постоянного тока 596
 - – – с печатным якорем 623
 - – – – полым немагнитным ротором 357
 - – – – постоянными магнитами 518
 - синхронный реактивный 486
 - – с гибким волновым ротором 395
 - – – катящимся ротором 395
 - – – электромагнитной редукцией 398
 - тиристорный 625
 - редукторный 398
 - шаговый 625
 - Шраге – Рихтера 635
- Демпферная обмотка синхронной машины 417
- Диаграмма круговая 307
- Потье 462
- Динамическая устойчивость синхронных машин 511
- Добавочные (дополнительные) полюсы 582
- Емкостная электрическая машина 656
- Закон электромагнитной индукции 19
- Законы электромеханики 39
- Затухание токов внезапного короткого замыкания 505
- Защита трансформаторов от перенапряжения 167
- Зона коммутации 577
- Зонтичный тип гидрогенератора 430
- Зубцовые гармонические МДС 72
- Изменение вторичного напряжения трансформатора 200
- Индуктивное сопротивление обмотки главное 294, 449
- – – переходное 499
 - – – сверхпереходное 500
 - – рассеяния машины асинхронной 294
 - – – – синхронной 449
 - – реакции якоря поперечной
 - – – – продольной 449
 - – – трансформатора 158
- Индуктивные синхронные машины 402
- Индукционный регулятор напряжения 378
- Искажение симметрии напряжений трансформатора 224
- Исполнительный двигатель асинхронный 396
- – постоянного тока 622
 - – с печатной обмоткой якоря 623
 - – – полым ротором 357
- Каскад электрический 625
- электромеханический 626
- Катушка 82
- Качания синхронной машины 507
- Класс коммутации 577
- нагревостойкости изоляции 143
- Коллектор 539
- Кольцевые обмотки 19
- Коммутация 571
- Компенсированные трехфазные асинхронные двигатели 639
- Коэффициент воздушного зазора 435
- демпфирования механических колебаний 507
 - заполнения пакета сталью 185
 - искажения синусоидальности кривой напряжения 436
 - насыщения 438
 - обмоточный 86
 - приведения напряжений обмоток трансформатора 167
 - – сопротивлений обмоток трансформатора 167

- – токов обмоток трансформатора 167
- Коэффициент распределения 94
- – рассеяния 97
- реакции якоря по оси поперечной 567
- – – – продольной 577
- Роговского 171
- трансформации 156
- укорочения обмотки 87
- усиления электромашинного усилителя 612
- электромагнитной связи 153
- КПД гидрогенератора 416
- двигателя асинхронного 312
- – синхронного 459
- трансформатора 203
- турбогенератора 416
- Кратность максимального момента асинхронного двигателя 317
- пускового момента асинхронного двигателя 317
- – тока асинхронного двигателя 520
- напряжения возбуждения синхронного генератора 512
- Кривые намагничивания ферромагнитных материалов 157
- подпитки добавочных полюсов 582
- Криогенный турбогенератор 517
- Критическое скольжение асинхронной машины 317
- Круговая диаграмма 299
- Круговой огонь на коллекторе 577
- Линейные двигатели 390**
- Магнита гидродинамические машины 620**
- Магнитопровод трансформатора 182
- – броневой 183
- – бронестержневой 183
- – пространственный трехфазный 162
- – стержневой 182
- – шихтованный 183
- Максимальная мощность синхронной машины 483
- Математическая модель машины асинхронной 270
- – – – с двумя обмотками на роторе 333
- – – постоянного тока 542
- – – синхронной 416
- – обобщенного преобразователя 47
- – трансформатора 151
- Машина двойного питания 527
- МДС многофазной обмотки 100
- обмотки возбуждения 561
- Метод двух реакций 445
- Механическая характеристика асинхронной машины 321
- – двигателя постоянного тока 599
- Мощность автотрансформатора проходная 213
- – расчетная 213
- машины асинхронной механическая 312
- – – скольжения 311
- – – электромагнитная 310
- – синхронной максимальная 475
- – – синхронизирующая 475
- Намагничивающий ток асинхронной машины 295**
- – трансформатора 151
- Напряжение короткого замыкания трансформатора 167
- между коллекторными пластинами максимальное 577
- – – – среднее 577
- Недовозбужденная синхронная машина 478
- Нейтраль геометрическая 571
- физическая 571
- Несимметрия фазных напряжений обмоток трансформатора 224
- Обмотка трансформатора вторичная 152**
- – высшего напряжения 152

- – дисковая чередующаяся 178
- – многослойная цилиндрическая 179
- – низшего напряжения 178
- – первичная 178
- Обмотка возбуждения 426
 - волновая 38, 556
 - граммовская 80
 - двухслойная 81
 - двухфазная 78
 - демпферная 417
 - кольцевая 89
 - короткозамкнутая 116
 - лягушечья 553
 - однослойная 82
 - петлевая 85, 554
 - распределенная 80, 417
 - синусная 406
- Обмотка сосредоточенная 424
 - стержневая 80
 - цепная 80
 - якоря машины постоянною тока 547
- Обобщенный преобразователь 47
- Обратимость электрических машин 40
- Опрокидывание поля 565
- Опыт короткого замыкания 167
 - холостого хода 171
- Опытное определение синхронных индуктивных сопротивлений синхронной машины 463
- Относительные единицы 121
- Отношение короткого замыкания синхронной машины 456
- Охлаждение внутреннее 128
 - водородное 128
 - водяное 128
 - косвенное 128
 - непосредственное 128
- Пазы элементарные 548**
- Параллельная работа генераторов постоянного тока 593
 - – трансформаторов 294
- Параметры синхронной машины 447
- Перенапряжения в трансформаторе 238
- Переходные индуктивные сопротивления синхронной машины 498
 - процессы в машине асинхронной 344
 - – – синхронной 496
 - – – трансформаторе 249
- Период коммутации 572
- Пик-трансформаторы 255
- Подпитка добавочных полюсов 582
- Подпятник 423
- Полюсное деление 69
- Полюсы главные 550
 - добавочные 550
- Постоянная времени 503
- Потери магнитные 123
 - добавочные 125
 - механические 124
 - электрические 122
- Превышение температуры 135
- Предел статической устойчивости синхронного двигателя 476
- Преобразователь частоты 248
- Приведение обмоток машин асинхронных 271
 - – синхронных 420
 - – – трансформаторов 157
- Противо-ЭДС 547
- Пуск асинхронного двигателя 345
- Пусковой момент асинхронного двигателя 323
- Рабочие характеристики асинхронного двигателя 372**
- Распределение напряжения трансформатора конечное 244
 - – – начальное 243
- Рассеяние дифференциальное 119
 - лобовое 119
 - пазовое 118
- Реактивная синхронная машина 485
 - ЭДС коммутации 575
- Реактивный вращающий момент 480
- Реактор 238
- Реакция якоря поперечная 444
 - – продольная 444

- – размагничивающая 445
- – синхронной машины 444
- Регулирование возбуждения синхронной машины 455
- частоты вращения 353, 599
- числа пар полюсов обмоток 354
- Самовозбуждение асинхронной машины 376
- генератора постоянного тока 586
- синхронной машины 442
- Самозапуск асинхронных двигателей 375
- Сельсин 404
- Серии электрических машин 406, 529
- Синхронизация грубая 472
- синхронного генератора 472
- Синхронизирующий момент 474
- Синхронная машина неявнополюсная 417
- – с клювообразными полюсами 520
- – – явнополюсная 417
- Синхронный генератор 453
- компенсатор 486
- Синхроскоп 473
- Система возбуждения синхронных машин бесщеточная 515
- – – – прямая 512
- – – – электромашинная косвенная 512
- Скольжение ротора 321
- Скорость нарастания напряжения возбуждения 514
- Сопротивление взаимной индукции синхронной машины 448
- – – трансформатора 157
- короткого замыкания трансформатора 233
- нулевой последовательности трансформатора 199
- обмотки якоря синхронной машины для токов обратной последовательности 491
- Статическая перегружаемость синхронной машины 473
- устойчивость 473
- Степень искрения щеток 580
- Схема замещения асинхронной машины 293
- – обмотки якоря синхронной машины по поперечной оси 499
- – – – – продольной оси 498
- – трансформатора 200, 210, 219
- Скотта 218
- Тахогенератор переменного тока 400
- постоянного тока 623
- Теория двух реакций синхронной явнополюсной машины 464
- Теплопередача лучеиспусканием 128
- конвекцией 128
- теплопроводностью 128
- Термическое сопротивление 134
- Тиристорные схемы возбуждения 516
- Тиристорный двигатель постоянного тока 625
- Ток включения трансформатора 235
- внезапного короткого замыкания синхронного генератора 502
- – – трансформатора 234
- Токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах 226
- Трансвертер 652
- Транспозиция элементарных проводников 181
- Трансформатор 149
- броневой 183
- бронестержневой 183
- грозоупорный 246
- групповой 163
- двухобмоточный 150
- масляный 176
- многообмоточный 207
- печной 252
- поворотный синусно-косинусный 406
- последовательного включения 217
- преобразования числа фаз 250

- сварочный 253
- сухой 177
- стержневой 182
- трехобмоточный 208
- трехфазный 162
- частоты 247
- Трансформаторная ЭДС 90
- Треугольник короткого замыкания трансформатора 169
- характеристический генератора постоянного тока 593
- Турбогенератор 415
- У**гловая характеристика активной мощности синхронной машины 473
- Угол нагрузки синхронной машины 374
- Удвоитель частоты 249
- Удельная синхронизирующая мощность 474
- Удельные потери в электротехнической стали 123
- Удельный синхронизирующий момент 474
- Умформер 649
- Универсальный коллекторный двигатель 633
- Уравнители обмотки якоря машины постоянного тока 553
 - – в трансформаторах 213
- Условие максимума КПД 126
 - статической устойчивости работы двигателей 338
- Условия включения синхронного генератора 472
 - самовозбуждения генератора постоянного тока 588
 - симметрии обмотки якоря машины постоянного тока 553
- Ф**азорегулятор 221
- Формы пазов короткозамкнутого ротора 333
- Форсировка возбуждения 512
- Х**арактеристика генератора постоянного тока внешняя 590
 - – – – нагрузочная 593
 - – – – регулировочная 592
 - – – – холостого хода 588
- механическая асинхронной машины 321
- синхронного генератора внешняя 453
 - – – короткого замыкания 453
 - – – нагрузочная 457
 - – – регулировочная 455
 - – – холостого хода 453
 - – – U-образная 478
- Характеристики асинхронного двигателя 308, 310, 312
 - трансформатора 199
- Ц**епные обмотки 80
- Ч**астота собственных колебаний ротора синхронной машины 57
- Число пазов на полюс и фазу 76
- Ш**аг обмотки первый 555
 - – частичный второй 557
- Щ**етки электрические 578
- Щеткодержатели 578
- Э**ДС взаимной индукции трансформатора 155
 - вращения 97
 - коммутируемой секции 576
 - обмотки якоря машины переменного тока 421
 - – – – постоянного тока 546
 - трансформаторная 96
 - фазы 95
- Электрическая машина – планета Земля 618
- Электромагнитный момент обобщенного преобразователя 103
- Электромашинный усилитель поперечного поля 609
 - – продольного поля 612
- Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя 313
 - – машины постоянного тока
 - – трансформатора 587, 597
- Я**корь машины постоянного тока 547
 - – синхронной 423, 444

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Учебник для бакалавров

Под редакцией *И. П. Копылова*

Редактор *В. В. Козлова*

Корректор *М. Б. Быкова*

Художественное оформление *А. И. Гиренко*

Компьютерная верстка *В. М. Дубильт*

Формат 84×108¹/₃₂.

Гарнитура «PetersburgС». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 35,44. Тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «Издательство Юрайт»

140004, Московская обл., г. Люберцы, 1-й Панковский проезд, д. 1.

Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru