

И. А. Данилов

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ

*Допущено Министерством высшего и среднего
образования СССР в качестве учебного пособия
для учащихся неэлектротехнических специальностей
вузов и техникумов*

Москва • Юрайт • 2013

УДК 621.3(075)

ББК 31.21я73

Д18

Автор:

Данилов Илья Александрович — кандидат технических наук, профессор, автор ряда книг по электротехнике.

Данилов, И. А.

Д18 Общая электротехника : учеб. пособие для бакалавров / И. А. Данилов. — М. : Издательство Юрайт ; ИД Юрайт, 2013. — 673 с. — Серия : Бакалавр. Базовый курс.

ISBN 978-5-9916-2106-9 (Издательство Юрайт)

ISBN978-5-9692-1401-9 (ИД Юрайт)

В учебном пособии изложены основы теории электрического и магнитного полей, цепей постоянного и переменного токов, электрических машин, аппаратов и приборов. Основное внимание уделено выявлению физической сущности явлений, происходящих в электрических цепях, принципов работы электротехнических устройств.

Книга состоит из двух частей. В первой части рассматриваются физическая сущность электрического тока, электромагнетизм, цепи постоянного и переменного токов, резонансные явления в электрических цепях и др. Во второй части представлены электрические машины постоянного и переменного токов, трансформаторы, трехфазные системы, электроизмерительные приборы.

В пособии содержится не только теоретический, но и методический материал, обеспечивающий самоконтроль усвоения информации и коррекцию ошибок, возникающих в процессе самостоятельной работы учащихся.

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования третьего поколения.

Для студентов неэлектротехнических специальностей.

УДК 621.3(075)

ББК 31.21я73

ISBN 978-5-9916-2106-9

(Издательство Юрайт)

ISBN 978-5-9692-1401-9

(ИД Юрайт)

© Данилов И. А., 2009

© ООО «ИД Юрайт», 2013

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	12
------------------	----

ГЛАВА 1

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Электрическая цепь.....	14
1.2. Электрический ток.....	16
1.3. Сопротивление и проводимость	19
1.4. Электрическое напряжение. Закон Ома	22
1.5. Связь между ЭДС и напряжением источника. Режимы работы электрической цепи.....	25
1.6. Работа и мощность электрического тока.....	27
1.7. Закон Джоуля — Ленца.....	29
1.8. Сложная электрическая цепь, основные определения. Первый закон Кирхгофа	32
1.9. Второй закон Кирхгофа	34
1.10. Эквивалентное преобразование участков цепи, содержащих последовательно и параллельно соединенные сопротивления.....	37
1.11. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений и обратное преобразование звезды в треугольник.....	40
1.12. Расчет электрической цепи с одним источником питания	43
1.13. Расчет электрической цепи с несколькими источниками питания методом наложения.....	46
1.14. Порядок расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа.....	48
1.15. Пример расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа.....	50
1.16. Проверка правильности расчета. Баланс мощностей.....	53
1.17. Линейные и нелинейные электрические цепи.....	54
1.18. Расчет простейших цепей с нелинейными сопротивлениями.....	57

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ.....

2.1. Магнитное поле. Магнитная индукция.....	61
----------------------------------------------	----

2.2. Магнитный поток. Закон Био — Савара.....	64
2.3. Магнитная проницаемость. Диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные вещества	67
2.4. Напряженность магнитного поля. Закон полного тока.....	70
2.5. Магнитное поле тороида.....	73
2.6. Закон электромагнитной индукции	75
2.7. Движение прямолинейного проводника в магнитном поле. Принцип Ленца	78
2.8. Явление самоиндукции. Индуктивность	81
2.9. Индуктивность тороида	84
2.10. Явление взаимной индукции.....	86
2.11. Ферромагнетизм	89
2.12. Магнитная цепь. Ферромагнитные материалы.....	93

ГЛАВА 3

ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.....	97
3.1. Переменный ток.....	97
3.2. Основные характеристики переменного тока.....	99
3.3. ЭДС и напряжение в цепи переменного тока.....	102
3.4. Получение переменной электродвижущей силы.....	104
3.5. Принцип действия генератора переменного тока.....	107
3.6. Положение витка в магнитном поле и фаза переменной ЭДС	110
3.7. Способы графического изображения синусоидальных величин	112
3.8. Векторная диаграмма.....	116
3.9. Сложение и вычитание синусоидальных величин.....	119
3.10. Среднее значение переменного тока.....	122
3.11. Действующее значение переменного тока	125
3.12. Коэффициент формы кривой. Коэффициент амплитуды.....	127
3.13. Активное сопротивление, индуктивность и емкость — параметры электрических цепей переменного тока.....	130
3.14. Цепь переменного тока с активным сопротивлением	131
3.15. Цепь переменного тока с индуктивностью.....	135
3.16. Цепь переменного тока с емкостью.....	138

3.17. Цепь переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости. Треугольник сопротивлений.....	142
3.18. Закон Ома для цепи переменного тока. Зависимость фазы тока от параметров цепи.....	146
3.19. Мощность в цепи переменного тока	149
3.20. Коэффициент мощности	152
3.21. Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности.....	154
3.22. Последовательное соединение активного сопротивления и емкости.....	158
3.23. Цепь переменного тока с параллельным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.....	162
3.24. Схемы замещения электрической ветви цепи переменного тока	165
3.25. Последовательное и параллельное соединения потребителей в цепи переменного тока	168
3.26. Расчет цепи переменного тока методом сопротивлений и проводимостей	171

ГЛАВА 4

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....

4.1. Резонанс напряжений. Физическая сущность явления	175
4.2. Резонанс напряжений. Основные определения	178
4.3. Волновое сопротивление и добротность контура ...	181
4.4. Частотные характеристики контура	184
4.5. Резонанс токов. Резонансная частота	187
4.6. Резонанс токов в идеальном контуре.....	190
4.7. Использование электрического резонанса в технических устройствах	193
4.8. Способы улучшения коэффициента мощности	195

ГЛАВА 5

СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА

ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Основные понятия	200
-----------------------------	-----

5.2. Изображение синусоидального тока (напряжения) вектором	202
5.3. Изображение вектора комплексным числом	205
5.4. Запись синусоидальных токов и напряжений в символической форме. Переход от символической записи к синусоидальной функции времени.....	208
5.5. Выражение сопротивлений и проводимостей в комплексной форме. Выражение электрической мощности в комплексной форме	212
5.6. Законы Ома и Кирхгофа в символической форме	215
5.7. Пример расчета неразветвленной электрической цепи	218
5.8. Применение символического метода к расчету разветвленных цепей переменного тока	221

ГЛАВА 6

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....

6.1. Причины возникновения переходных процессов. Законы коммутации	224
6.2. Принужденные и свободные составляющие токов и напряжений	227
6.3. Включение катушки индуктивности под постоянное напряжение	230
6.4. Включение катушки индуктивности под переменное напряжение.....	234

ГЛАВА 7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ПОСТОЯННОГО ТОКА.....

7.1. Устройство электрических машин постоянного тока. Обратимость машин	238
7.2. Принцип работы машины постоянного тока	242
7.3. Понятие об обмотке якоря. Коллектор и его назначение.....	248
7.4. ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря	253
7.5. Реакция якоря.....	256
7.6. Коммутация и способы ее улучшения.	

Дополнительные полюсы	259
7.7. Генератор постоянного тока независимого возбуждения	264
7.8. Генераторы с самовозбуждением	267
7.9. Самовозбуждение генераторов постоянного тока	274
7.10. Потери энергии и коэффициент полезного действия генераторов постоянного тока.....	276
7.11. Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Вращающий момент.....	279
7.12. Связь между вращающим и полезным моментами на валу двигателя.....	283
7.13. Механическая и рабочие характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.....	285
7.14. Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.....	288
7.15. Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	291
7.16. Пуск и реверсирование двигателей постоянного тока	295
7.17. Потери энергии и КПД двигателей постоянного тока	299
ГЛАВА 8	
ТРЕХФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ.....	301
8.1. Принцип получения трехфазной ЭДС. Основные схемы соединения трехфазных цепей	301
8.2. Соединение трехфазной цепи звездой. Четырехпроводная и трехпроводная цепи.....	305
8.3. Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в трехфазной цепи, соединенной звездой	308
8.4. Назначение нулевого провода в четырехпроводной цепи	311
8.5. Соединение нагрузки треугольником. Векторные диаграммы, соотношения между	

фазными и линейными токами и напряжениями	313
8.6. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи. Коэффициент мощности	316
8.7. Выбор схем соединения осветительной и силовой нагрузок при включении их в трехфазную сеть	319

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	322
9.1. Вращающееся магнитное поле.....	322
9.2. Устройство асинхронного двигателя.....	330
9.3. Принцип действия асинхронного двигателя. Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора.....	333
9.4. Скольжение и скорость вращения ротора.....	334
9.5. Влияние скольжения на ЭДС в обмотке ротора	337
9.6. Зависимость величины и фазы тока от скольжения и ЭДС ротора	339
9.7. Вращающий момент асинхронного двигателя	342
9.8. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму зависимости вращающего момента от скольжения.....	345
9.9. Пуск асинхронного двигателя	347
9.10. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя.....	350
9.11. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронного двигателя.....	353
9.12. Однофазный асинхронный двигатель	356
9.13. Синхронный генератор	360
9.14. Синхронный двигатель	363

ГЛАВА 10

ТРАНСФОРМАТОРЫ.....	367
10.1. Назначение трансформаторов и их применение	367
10.2. Устройство трансформатора.....	369
10.3. Формула трансформаторной ЭДС	372
10.4. Принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации.....	375

10.5. Режим холостого хода трансформатора	377
10.6. Опыт холостого хода трансформатора.....	381
10.7. Работа трансформатора под нагрузкой.....	383
10.8. Внешняя характеристика трансформатора. Процентное изменение вторичного напряжения	386
10.9. Потери энергии и коэффициент полезного действия трансформатора	390
10.10. Трехфазные трансформаторы.....	393
10.11. Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы	396
10.12. Сварочные трансформаторы.....	399

ГЛАВА 11

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ ...403

11.1. Сущность и значение электрических измерений.....	403
11.2. Основные методы электрических измерений. Погрешности измерительных приборов	405
11.3. Классификация электроизмерительных приборов. Условные обозначения на шкале	408
11.4. Электроизмерительные приборы непосредственной оценки, общие принципы устройства	410
11.5. Приборы магнитоэлектрической системы.....	413
11.6. Приборы электромагнитной системы.....	417
11.7. Приборы электродинамической системы	419
11.8. Цифровые приборы.....	421
11.9. Измерение напряжений, токов и мощности	423
11.10. Расширение пределов измерения приборов непосредственной оценки	426
11.11. Измерение мощности в трехфазных цепях.....	429
11.12. Индукционный счетчик электрической энергии. Учет энергии в однофазных и трехфазных цепях.....	431
11.13. Измерение сопротивлений	435
11.14. Измерение сопротивлений с помощью моста постоянного тока	439
11.15. Магнитоэлектрический осциллограф	441
11.16. Электронный осциллограф	443
11.17. Электрические измерения неэлектрических величин.....	446

ГЛАВА 12	
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 ВОЛЬТ	450
12.1. Назначение и классификация электрических сетей. Требования, предъявляемые к электрическим сетям	450
12.2. Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 вольт	452
12.3. Общие указания о расчете сетей, способы изображения сетей на графиках	455
12.4. Падение и потеря напряжения в линиях постоянного и переменного тока	457
12.5. Расчет проводов по допустимой потере напряжения линий постоянного, однофазного и трехфазного токов	460
12.6. Сопоставление двухпроводной однофазной системы передачи энергии с трех- и четырехпроводной системами трехфазного тока по расходу цветного металла	464
12.7. Расчет проводов по допустимому нагреву	467
12.8. Плавкие предохранители. Характеристики плавких вставок	470
12.9. Выбор плавких вставок для световой, силовой и групповой нагрузок. Особенности установки предохранителей в четырехпроводных сетях трехфазного тока	473
12.10. Выбор сечения проводов в зависимости от установленных предохранителей	476
12.11. Действие электрического тока на организм человека. Понятие о напряжении прикосновения. Допустимые значения напряжения прикосновения в зависимости от характера помещений	478
12.12. Защитное заземление трехпроводных сетей трехфазного тока	481
12.13. Защитное заземление четырехпроводных сетей трехфазного тока	484
12.14. Устройство и простейший расчет заземлителей	487

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ И КОНСУЛЬТАЦИИ	490
К ГЛАВЕ 1	490
К ГЛАВЕ 2	513
К ГЛАВЕ 3	522
К ГЛАВЕ 4	550
К ГЛАВЕ 5	561
К ГЛАВЕ 6	569
К ГЛАВЕ 7	573
К ГЛАВЕ 8	589
К ГЛАВЕ 9	597
К ГЛАВЕ 10.....	611
К ГЛАВЕ 11.....	624
К ГЛАВЕ 12.....	638

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое читателю учебное пособие разработано на основе курса «Общая электротехника», прочитанного автором в Московском институте инженеров сельскохозяйственного производства имени В. П. Горячкина.

Структура предлагаемой книги построена таким образом, что она может быть использована как при наличии технических средств самоконтроля с выбором ответов, так и в отсутствие этих средств, что особенно важно для заочных учебных заведений.

Рекомендуется следующий порядок работы с книгой: 1) прочтение минимального объема обучающего текста (как правило, одного параграфа); 2) выполнение заданий соответствующей карточки самоконтроля; 3) исправление ошибок с помощью преподавателя или самостоятельно.

Разъяснение ошибок приведено в конце книги, в консультациях. Номер необходимой консультации проставлен в каждой строке ответов карточек самоконтроля.

Убедиться в правильности выбранных ответов или обнаружить ошибку помогают числа, указанные в скобках возле номера каждой карточки самоконтроля.

Надо выписать номера, соответствующие выбранным ответам на пять вопросов карточки самоконтроля, затем взять две последние цифры каждого номера и сложить пять получившихся чисел. Если сумма этих пяти чисел совпадает с числом, указанным возле номера карточки в скобках, то все пять ответов правильны. В противном случае один или несколько ответов неправильны. Например, отвечая на вопросы карточки № 1.2, вы выбираете ответы, которым соответствуют номера 117, 119, 100, 122, 96, после этого следует взять две последние цифры каждого числа и, сложив получившиеся числа, найти сумму $17 + 19 + 00 + 22 + 96 = 154$. Это число совпадает с указанным в скобках возле номера карточки. Следовательно, все пять ответов правильны и можно переходить к изучению следующего параграфа.

Не рекомендуется обращаться к консультациям, пока не сделана попытка самостоятельно выполнить задания карточки самоконтроля. Ответы на вопросы — не цель работы, а лишь средство убедиться в правильности понимания изучаемого материала.

Учебный материал изложен кратко, с учетом времени, отводимого учебным планом на каждую тему. Назначение обучающей программы — обеспечить понимание существа предмета и заложить основы для дальнейшей самостоятельной работы.

ГЛАВА 1

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Электрическая цепь

Одна из важнейших задач электротехники — передача энергии на ближние и дальние расстояния. С этой целью энергия падающей воды, топлива или других источников превращается в электрическую энергию, которая по проводам линии передачи подводится к потребителю. У потребителя электрическая энергия снова преобразуется в тепловую, механическую, химическую, световую и др.

Источники электрической энергии, соединенные проводами с потребителями, образуют электрическую цепь.

Таким образом, электрическая цепь состоит из следующих основных элементов:

а) одного или нескольких источников электрической энергии, преобразующих энергию какого-либо вида в электрическую (генератор, аккумуляторная батарея, термоэлемент);

б) одного или нескольких приемников, преобразующих электрическую энергию в энергию других видов (электрический двигатель, электролитическая ванна, электрическая печь);

в) проводов.

Кроме того, в электрическую цепь обычно включаются коммутационная аппаратура и устройства защиты сети. Коммутационные устройства предназначены для включения и выключения отдельных элементов цепи, а

автоматы защиты и плавкие предохранители разрывают цепь при возникновении аварийных режимов работы.

Будем называть простой (неразветвленной) электрической цепью замкнутый контур, образованный источником электрической энергии, двумя проводами и приемником (потребителем) энергии (рис. 1.1).

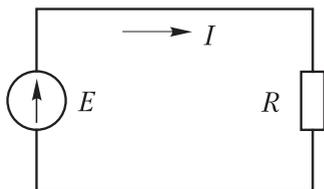


Рис. 1.1

В разветвленной электрической цепи всегда можно выделить несколько контуров, в том числе и не содержащих источников электроэнергии.

В источнике электрической энергии возникает сила, способная перемещать электрические заряды вдоль замкнутого контура, имеющего конечное сопротивление. Работа, совершаемая этой силой при переносе единичного положительного заряда от плюсового зажима источника к минусовому, называется электродвижущей силой.

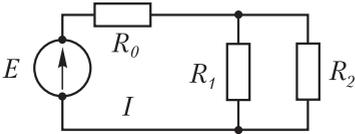
Электродвижущую силу сокращенно называют ЭДС и обозначают буквой E . Направление ЭДС совпадает с направлением движения положительных зарядов, которые перемещаются от плюсового зажима источника электрической энергии через приемник к минусовому зажиму источника и далее внутри источника от минусового зажима к плюсовому.

Карточка № 1.1 (53)

Электрическая цепь

Какая форма энергии наиболее удобна для дальних передач в наземных условиях?	Световая	112
	Тепловая	113
	Электрическая	114
	Механическая	115

Продолжение карт. № 1.1

Какие устройства используются в качестве потребителей электрической энергии?	Электrolитическая ванна, гальванический элемент	111
	Прожектор, аккумуляторная батарея	110
	Термогенератор, электрическая печь	109
 <p>Можно ли назвать изображенную здесь электрическую цепь простой (неразветвленной)?</p>	Можно	108
	Нельзя	107
В какой строке полярность источника и направление ЭДС указаны правильно?		106
		105
В какой строке полярность источника, питающего нагрузку, и направление движения положительных зарядов показаны правильно?		116
		104

1.2. Электрический ток

Движущиеся заряды образуют в цепи электрический ток, направление которого совпадает с направлением движения положительных электрических зарядов. Опыт показывает,

что в стационарном режиме нигде в цепи не происходит накопления зарядов. Следовательно, путь тока всегда имеет вид замкнутого контура.

Электрический ток количественно характеризуют силой тока I . Если сила тока с течением времени не меняется, то ее величина определяется выражением

$$I = \frac{Q}{t}, \quad (1.1)$$

где Q — количество электричества (заряд), прошедшее через поперечное сечение проводника за время t .

Обычно в некотором объеме вещества наибольшей подвижностью обладают электроны, вместе с которыми под действием ЭДС перемещается отрицательный заряд. В электролитах могут свободно перемещаться как отрицательно, так и положительно заряженные ионы.

Таким образом, под силой тока понимают количество электричества (заряд), переносимое заряженными частицами через поперечное сечение проводника в единицу времени.

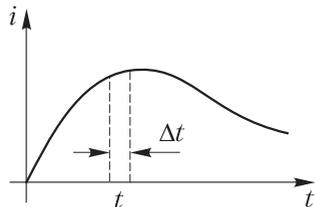
Сила тока измеряется в амперах (А).

Из (1.1) находим

$$[Q] = [I][t] = \text{А} \cdot \text{с}.$$

Следовательно, единица измерения заряда имеет размерность А·с. Эту единицу назвали кулоном (Кл).

Если ток с течением времени непрерывно изменяется, как это показано на рис. 1.2, то его силу в некоторый момент времени t_1 приближенно можно найти из отношения



$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

где ΔQ — заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за время Δt , а время Δt выбрано

таким малым, что в его пределах ток изменяется незначительно и может быть принят примерно постоянным.

Рис. 1.2

Уменьшая Δt до бесконечно малой величины dt , получим точное значение силы тока в данный момент времени:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1.2)$$

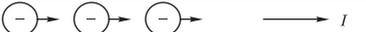
Здесь через dQ обозначен заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за бесконечно малое время dt . Величина dQ также бесконечно малая.

Сила тока, определяемая для каждого момента времени выражением (1.2), называется мгновенным значением электрического тока.

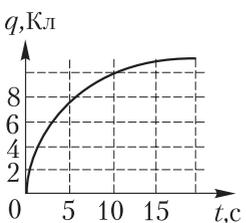
Величины, относящиеся к постоянному току, не изменяющиеся с течением времени, принято обозначать большими буквами (например, I , Q), а величины, относящиеся к переменному току, — малыми (i , q и т.д.). Этой условности мы будем придерживаться и в дальнейшем.

Карточка № 1.2(82)

Электрический ток

В какой строке направление движения зарядов и направление тока указаны правильно?		117
		103
		118
В замкнутой электрической цепи протекает постоянный ток, при этом через поперечное сечение проводника в течение 10 мин проходит 60 Кл электричества. Определите силу тока.	6 А	102
	0,3 А	101
	0,1 А	119
	Для решения задачи данных недостаточно	120
В течение 1 с через поперечное сечение проводника прошел заряд, равный 1 Кл. Чему равна сила тока?	1 А	100
	Задача не определена, так как неизвестна площадь поперечного сечения проводника	99

Продолжение карт. № 1.2

 <p>Заряд конденсатора увеличивается с течением времени, как показано на графике. Определите примерно силу зарядного тока при $t_1 = 7,5$ с.</p>	9 А	121
	0,9 А	98
	0,4 А	122
	0,2 А	97
<p>В течение 1 с заряд конденсатора уменьшился на 1 Кл. Определите силу разрядного тока в момент начала разряда.</p>	0,1 А	123
	1 А	96
	Задача не определена, так как неизвестен закон изменения заряда с течением времени	124
	10 А	95

1.3. Сопротивление и проводимость

Все вещества при обычной температуре обладают свойством препятствовать движению зарядов, ограничивать величину тока в цепи. Это свойство характеризуется электрическим сопротивлением вещества. Электрическое сопротивление обозначают буквой R или r . Величину, обратную сопротивлению, называют проводимостью и обозначают буквой G или g :

$$G = \frac{1}{R}. \quad (1.3)$$

На рис. 1.3 показано условное изображение сопротивлений на схемах.

Если образец из некоторого вещества имеет по всей длине l одинаковое сечение S , то его сопротивление выражается формулой

$$R = \frac{R_{уд}l}{S} = \frac{l}{G_{уд}S}. \quad (1.4)$$

Здесь $R_{уд}$ и $G_{уд}$ — величины, постоянные для данного вещества (при постоянной температуре), характеризующие его способность проводить электрический ток.

Величину $R_{уд}$ называют удельным электрическим сопротивлением, соответственно, $G_{уд}$ называют удельной электрической проводимостью. Эти величины измерены для различных веществ и приводятся в справочных таблицах.

Сопротивление вещества зависит от его температуры. Характер этой зависимости определяется механизмом проводимости в веществе. У металлов с увеличением температуры сопротивление увеличивается, так как усиливается тепловое движение молекул, препятствующих перемещению зарядов. У электролитов, наоборот, с увеличением температуры сопротивление уменьшается. Это объясняется увеличением количества свободных носителей заряда вследствие более интенсивной диссоциации молекул. Такая же зависимость сопротивления от температуры наблюдается и у некоторых твердых веществ, например у угля, кремния, у которых с увеличением температуры все большее количество электронов теряет связь с ядрами атомов и переходит в свободное состояние.

Зависимость сопротивления от температуры при температурах от -100° до $+300^\circ \text{C}$ достаточно точно выражается формулой

$$R = R_0 (1 + \alpha t), \quad (1.5)$$

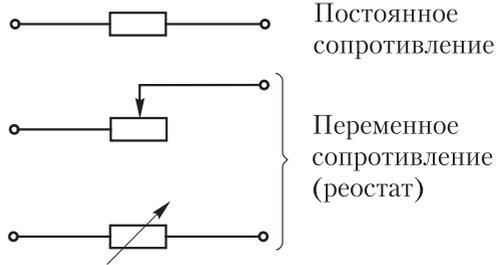


Рис. 1.3

где R — сопротивление при некоторой температуре; R_0 — сопротивление при нуле градусов; α — температурный коэффициент сопротивления; t — температура.

Если температура t выше нуля, то она подставляется в формулу (1.5) со знаком «+», если температура t ниже нуля — со знаком «-».

Коэффициент α для большинства металлов составляет около 0,004. Для электролитов α — величина отрицательная, равная примерно $-0,02$.

Особенно резкая зависимость сопротивления от температуры наблюдается у полупроводников, которые используются для изготовления термосопротивлений.

Карточка № 1.3 (267) Сопротивление и проводимость

Сопротивление провода 10 Ом. Чему равна его проводимость?	10 Ом ⁻¹	125
	0,1 Ом ⁻¹	94
	0,1 Ом ⁻¹	126
Длина и диаметр провода уменьшены в 2 раза. Как изменилось сопротивление провода?	Осталось неизменным	93
	Уменьшилось в 2 раза	127
	Увеличилось в 2 раза	92
Длина и площадь поперечного сечения провода увеличены в 2 раза. Как изменилась проводимость провода?	Осталась неизменной	128
	Уменьшилась в 2 раза	91
	Увеличилась в 2 раза	129
Температура снизилась. Какое из приведенных высказываний истинно?	Сопротивление медного провода увеличилось	90
	Сопротивление угольного стержня уменьшилось	130
	Сопротивление электролита увеличилось	89
	Проводимость стального провода уменьшилась	131

Продолжение карт. № 1.3

Сопротивление нагревательного элемента равно 50 Ом. Температура элемента возросла на 250°. Чему стало равно его сопротивление, если $\alpha = 0,004$?	50 Ом	88
	100 Ом	132
	200 Ом	87

1.4. Электрическое напряжение. Закон Ома

Электрическое напряжение между точками a и b равно работе, совершаемой источником ЭДС при перемещении единичного положительного заряда из точки a в точку b .

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{Fl}{Q}.$$

Здесь U — напряжение между точками a и b ; A — работа, совершаемая при перемещении заряда Q из точки a в точку b ; F — сила, действующая на заряд Q ; l — расстояние между точками a и b .

Это соотношение позволяет найти размерность единицы измерения напряжения, названной вольт (В):

$$[U] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^3} = \text{В}.$$

Направление перемещения положительных зарядов, а следовательно, и направление тока, протекающего в замкнутой цепи, совпадает с направлением ЭДС.

При протекании тока через участок цепи, имеющий сопротивление R , на концах этого участка возникают потенциалы φ_1 и φ_2 , разность которых равна напряжению, падающему на этом участке (рис. 1.4).

На каждом участке цепи (рис. 1.5) ток протекает от точки с большим потенциалом (φ_1) к точке с меньшим потенциалом (φ_2).

Падение напряжения на участке цепи, ток и сопротивление этого участка связаны простой зависимостью, которую называют законом Ома:

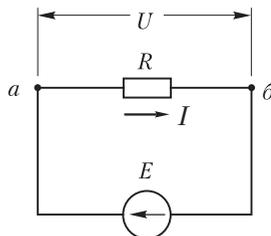


Рис. 1.4

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) позволяет найти единицу измерения сопротивления:

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Эта единица называется омом (Ом).

Найдем также размерность $R_{\text{уд}}$ и $G_{\text{уд}}$. Из (1.4) и (1.3) получаем:

$$[R_{\text{уд}}] = \frac{[R][S]}{[l]} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м};$$

$$[G_{\text{уд}}] = \frac{1}{[R_{\text{уд}}]} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}.$$

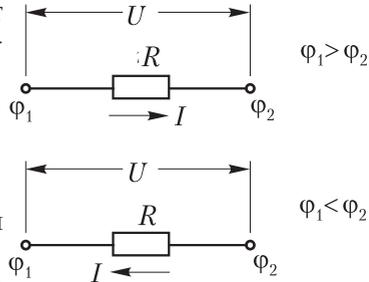


Рис. 1.5

При вычислении сопротивления металлической проволоки удобно площадь сечения S выражать в мм^2 , тогда

$$[G_{\text{уд}}] = \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}; [R_{\text{уд}}] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Закон Ома справедлив и для всей замкнутой цепи (рис. 1.6).

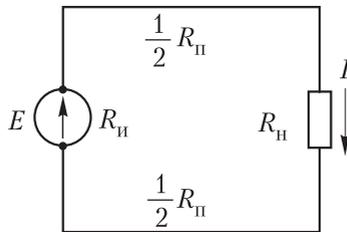


Рис. 1.6

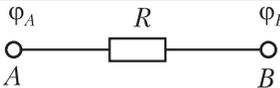
$$I = \frac{E}{R_{\text{и}} + R_{\text{п}} + R_{\text{н}}}; E = IR_{\text{и}} + I(R_{\text{п}} + R_{\text{н}}). \quad (1.7)$$

Здесь E — электродвижущая сила источника электрической энергии; $R_{\text{и}}$ — собственное (внутреннее) сопро-

тивление источника; $R_{\text{п}}$ — сопротивление проводов линии электропередачи; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки (приемника энергии).

Карточка № 1.4 (270)

Электрическое напряжение. Закон Ома

Верно ли, что напряжение равно работе электрического тока?	Верно	86
	Нет	133
	Верно при условии, что работа совершена током 1 А	85
	Верно при условии, что электрическим током перенесен 1 Кл электричества	134
Сопротивление провода 1 Ом. По проводу течет ток 10 А. Чему равна разность потенциалов концов провода?	1 В	84
	10 В	135
	0,1 В	83
<p> φ_A R φ_B  $\varphi_A = -10$ В; $\varphi_B = 5$ В. </p> <p>Куда течет ток?</p>	От точки A к точке B	136
	От точки B к точке A	82
В предыдущем случае $R = 5$ Ом. Определите величину силы тока.	1 А	81
	2 А	137
	3 А	80
	5 А	138
ЭДС источника $E = 12$ В. Ток в цепи $I = 1$ А. Сопротивление приемника $R_{\text{н}} = 11,5$ Ом. Определите внутреннее сопротивление источника, если $R_{\text{п}} = 0,2$ Ом.	0,5 Ом	79
	0,3 Ом	139
	0,2 Ом	78

1.5. Связь между ЭДС и напряжением источника. Режимы работы электрической цепи

Закон Ома позволяет установить связь между ЭДС источника и напряжением на его зажимах.

Применяя закон Ома к внешнему участку цепи, заключенному между зажимами источника, находим

$$I = \frac{U}{R_{\text{п}} + R_{\text{н}}}; U = (R_{\text{п}} + R_{\text{н}})I, \quad (1.8)$$

где U — напряжение на зажимах источника.

Подставляя (1.8) в (1.7), получаем искомую зависимость:

$$E = IR_{\text{н}} + U; U = E - IR_{\text{н}}. \quad (1.9)$$

Величина $IR_{\text{н}}$ представляет собой падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника. Таким образом, напряжение на зажимах источника равно его ЭДС, уменьшенной на величину падения напряжения внутри источника.

Если зажимы источника ЭДС разомкнуты, то ток в цепи отсутствует: $I = 0$, при этом $E = U$. Такой режим работы источника называется режимом холостого хода. Следовательно, ЭДС источника равна напряжению на его зажимах, когда источник работает в режиме холостого хода, или короче: ЭДС источника E равна напряжению холостого хода $U_{\text{х.х}}$:

$$E = U_{\text{х.х}}.$$

Ясно, что ЭДС, как и напряжение, измеряется в вольтах и может быть замерена вольтметром, подсоединенным к зажимам источника электрической энергии, работающего в режиме холостого хода.

Режим работы, при котором зажимы источника соединены между собой проводом, имеющим очень малое сопротивление ($R \approx 0$), называется коротким замыканием источника.

Полагая в (1.7) $R_{\text{п}} + R_{\text{н}} = 0$, находим

$$I_{\text{кз}} = \frac{E}{R_{\text{н}}},$$

где $I_{кз}$ — ток короткого замыкания.

Внутреннее сопротивление источника ЭДС $R_{и}$ обычно невелико, поэтому ток короткого замыкания может достигать больших величин и представлять опасность для элементов цепи и обслуживающего персонала. Режим короткого замыкания, как правило, является аварийным.

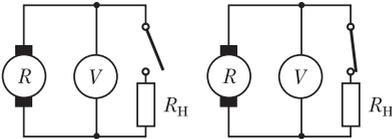
Основным режимом работы электрической цепи является номинальный или расчетный режим. В этом режиме генератор работает при высоком коэффициенте полезного действия, отдавая в течение длительного времени максимально допустимый рабочий ток при номинальном напряжении. Все приемники электрической энергии рассчитываются на номинальное напряжение сети. Это напряжение регламентируется государственным стандартом. Для сетей постоянного тока оно обычно устанавливается на уровне 110, 220 или 440 В. Сети электроснабжения автомобилей и тракторов обычно рассчитаны на напряжение 12 В.

Карточка № 1.5 (312)

Связь между ЭДС и напряжением источника. Режимы работы электрической цепи

ЭДС аккумулятора 12 В. При разрядном токе 10 А напряжение на зажимах 11,7 В. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.	0,3 Ом	140
	0,03 Ом	77
	0,07 Ом	141
	0,1 Ом	76
ЭДС источника и его внутреннее сопротивление постоянны. Ток, создаваемый источником в цепи, уменьшился. Как изменилось напряжение на зажимах источника?	Увеличилось	142
	Уменьшилось	75
	Не изменилось	143
ЭДС источника и сопротивление потребителя постоянны. Внутреннее сопротивление источника уменьшилось. Как изменилось напряжение на зажимах потребителя?	Увеличилось	74
	Уменьшилось	144
	Не изменилось	73

Продолжение карт. № 1.5

 <p style="text-align: center;">а) б)</p>	<p>а) Напряжение на нагрузке; б) ЭДС генератора</p>	145
<p>Что показывает вольтметр в случае а); в случае б)?</p>	<p>а) ЭДС генератора; б) ЭДС генератора</p>	72
<p>ЭДС генератора 12 В. Напряжение на зажимах 11,8 В. Ток в цепи 10 А. Определите ток короткого замыкания.</p>	<p>а) Напряжение на нагрузке; б) напряжение на нагрузке</p>	146
	<p>а) ЭДС генератора; б) напряжение на нагрузке</p>	71
	<p>Задача не определена, так как неизвестно внутреннее сопротивление генератора</p>	147
	590 А	70
	600 А	148
	1200 А	69

1.6. Работа и мощность электрического тока

Найдем работу, совершаемую электрическим током, протекающим по участку электрической цепи с напряжением U (см. рис. 1.4).

Мы уже отмечали (см. 1.4), что напряжение равно работе совершаемой источником ЭДС при перемещении *единичного* заряда вдоль рассматриваемого участка цепи. Если перемещается не единичный заряд, а некоторый заряд Q , то совершаемая при этом работа A будет в Q раз большей:

$$A = UQ. \quad (1.10)$$

Выразив заряд через силу тока и время, получим

$$A = UIt.$$

За бесконечно малое время dt совершается бесконечно малая работа

$$dA = UI dt. \quad (1.11)$$

Определим мощность P как работу, совершаемую в единицу времени. Тогда

$$P = \frac{dA}{dt} = UI; \quad dA = P dt. \quad (1.12)$$

Из этих формул определяются единица измерения мощности и единица измерения работы электрического тока:

$$[P] = [U] \cdot [I] = \text{В} \cdot \text{А} = \text{Вт}.$$

Единица измерения мощности, равная одному вольту, умноженному на один ампер, называется ваттом (Вт). Единицу мощности, в 1000 раз большую, чем ватт, называют киловаттом (кВт).

Работа электрического тока измеряется в джоулях (Дж):

$$[A] = [P] \cdot [t] = \text{Вт} \cdot \text{с} = \text{Дж}.$$

Джоуль или ватт-секунда — сравнительно небольшая единица, поэтому на практике часто применяется единица в 3600 раз большая, которую называют ватт-часом (час содержит 3600 с):

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}.$$

Таким образом, ватт-час (Вт·ч) — это работа, совершаемая источником электрической энергии мощностью один ватт в течение одного часа.

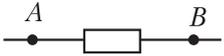
Единицу в 1000 раз большую называют киловатт-часом (кВт·ч).

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Итак, мощность измеряется в ваттах (вольт-амперах), киловаттах; работа измеряется в джоулях, ватт-часах, киловатт-часах.

Карточка № 1.6 (282)

Работа и мощность электрического тока

 <p> $\varphi_A = -10 \text{ В};$ $\varphi_B = 5 \text{ В}.$ </p> <p>Из точки A в точку B переместился заряд 10 Кл. Определите величину работы.</p>	50 В·А·с	149
	150 В·А·с	68
	500 В·А·с	150
	Задача не определяется, так как неизвестно напряжение между точками AB	67
<p>Генератор при напряжении 110 В вырабатывает ток силой 10 А. Определите работу электрического тока в течение 1 ч.</p>	1100 В·А·ч	151
	110 В·А·ч	66
	110 В·А·с	152
<p>Ток в цепи увеличился в 2 раза, напряжение источника уменьшилось в 2 раза. Как изменилась мощность, отдаваемая источником?</p>	Уменьшилась в 2 раза	65
	Не изменилась	153
	Увеличилась в 2 раза	64
<p>Генератор при напряжении 110 В вырабатывает ток силой 10 А. Определите мощность, развиваемую генератором.</p>	1100 Вт	154
	110 кВт	63
	110 Вт·ч	155
<p>В течение 1 мин генератор выработал $3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ энергии. Определите мощность, развиваемую генератором.</p>	$3,6 \cdot 10^6 \text{ Вт}$	62
	60 кВт	156
	600 кВт	61

1.7. Закон Джоуля – Ленца

Этот физический закон был открыт в 1844 г. русским академиком Э. Х. Ленцем и английским физиком Дж. Джоулем при исследовании тепловых действий тока.

Аналитическое выражение закона легко получить из формулы (1.11), заменив напряжение произведением $U = IR$. Пропедев эту подстановку, находим

$$dA = I^2 R dt \text{ (Дж)}.$$

Известно, что электрическая энергия переходит в тепловую, а тепловая в электрическую со следующим эквивалентом:

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал.}$$

Следовательно, если работу электрического тока выражать в калориях, то формула закона Джоуля–Ленца примет вид

$$dQ = 0,24 I^2 R dt \text{ (кал)}. \quad (1.13)$$

Здесь dQ — количество тепла, выделенного током в сопротивлении R за время dt .

Если в течение времени t ток не меняется по величине, то последнее равенство примет вид

$$Q = 0,24 I^2 R t \text{ (кал)}. \quad (1.14)$$

Таким образом, количество выделенного в электрической цепи тепла пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению цепи и времени протекания тока.

Закон Джоуля — Ленца широко используется при расчетах тепловых режимов источников электрической энергии, линий электропередачи, потребителей и других элементов электрической цепи.

Из этого закона, в частности, следует, что передачу электрической энергии выгодно осуществлять при высоком напряжении. Действительно, повышая напряжение линии передачи заданной мощности, мы пропорционально уменьшаем величину тока ($P = UI$), а это приводит к резкому уменьшению потерь на нагрев проводов, так как потери пропорциональны квадрату силы тока.

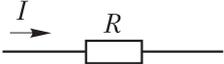
Преобразование электрической энергии в тепловую имеет очень большое практическое значение: широко используются электрическое освещение, обогрев, сварка, основанные на тепловом действии силы тока.

Вместе с тем тепловое действие тока во многих случаях оказывается вредным: оно вызывает потери электрической энергии при ее передаче, из-за нагрева источников электрической энергии приходится применять специальные устройства для охлаждения.

Во многих случаях условиями нагрева проводов определяется площадь их поперечного сечения.

Карточка № 1.7 (293)

Закон Джоуля – Ленца

<p>Какие равенства надо использовать, чтобы из выражения</p> $A = Pt$ <p>получить выражение</p> $A = I^2 R t?$	$I = \frac{P}{U}; I = \frac{U}{R}$	157
	$P = \frac{A}{t}; U = IR$	60
	$P = UI; U = IR$	158
<p>Какому количеству калорий эквивалентен 1 кВт·ч?</p>	<p>Для решения задачи недостаточно данных</p>	59
<p>Сколько тепла выделит электрическая лампа мощностью 100 Вт в течение часа?</p>	<p>Задача не определена, так как неизвестен коэффициент полезного действия лампы</p>	58
<div style="text-align: center;">  </div> <p> $I = 0,5 \text{ A};$ $R = 100 \text{ Ом};$ $t = 1 \text{ мин.}$ </p> <p>Какое количество тепла выделится в сопротивлении R?</p>	<p>86,4 ккал</p>	159
<p>Сопротивление обмотки якоря генератора 0,01 Ом. Ток генератора 10 А. Сколько тепла выделится в обмотке якоря в течение 1 с?</p>	<p>6 кал</p> <p>60 кал</p> <p>360 кал</p>	57 161 56
<p>Сопротивление обмотки якоря генератора 0,01 Ом. Ток генератора 10 А. Сколько тепла выделится в обмотке якоря в течение 1 с?</p>	<p>0,24 кал</p> <p>0,24 ккал</p> <p>Задача не определена, так как неизвестна мощность генератора</p>	162 55 163

1.8. Сложная электрическая цепь, основные определения. Первый закон Кирхгофа

Электрическая цепь может иметь сложную форму, содержать несколько источников и большое количество потребителей электрической энергии, соединенных различными способами.

Характерными элементами такой цепи являются ветвь, узел и контур.

Ветвью электрической цепи называют участок, в котором ток в данный момент времени имеет одно и то же значение и изменяется одновременно и одинаково на всем протяжении участка. В частном случае ток может оставаться постоянным и одинаковым в пределах всего участка цепи, называемого ветвью.

Ветвь может содержать один или несколько последовательно соединенных источников ЭДС, может совсем не содержать источников ЭДС. Участки *agf*, *af*, *ab* и т.д. являются ветвями цепи, изображенной на рис. 1.7.

Точка электрической схемы, представляющая собой место соединения трех или большего числа ветвей, называется *узлом*. В цепи, изображенной на рис. 1.7, четыре такие точки: *a*, *b*, *d*, *f*.

Замкнутая фигура, образованная ветвями электрической цепи, называется *контуром*. В рассматриваемой цепи можно выделить шесть контуров: *afga*, *abdfa*, *bcd b*, *abdfga*, *abcdfa*, *abcdfga*.

Первый закон Кирхгофа устанавливает, что алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0. \quad (1.15)$$

Первый закон Кирхгофа непосредственно следует из того факта, что ни в одном узле схемы не происходит накопления электрических заря-

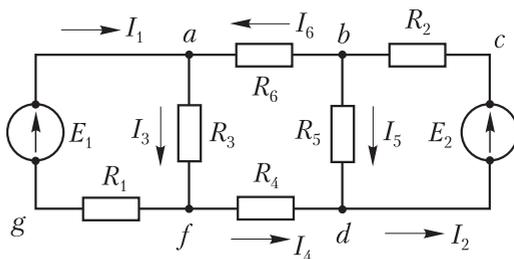


Рис. 1.7

дов, т.е. количество зарядов, притекающих к узлу в единицу времени, равно количеству зарядов, утекающих от узла.

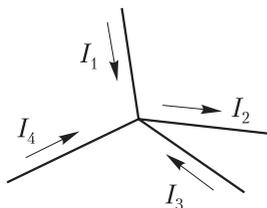


Рис. 1.8

На рис. 1.8 изображен узел некоторой сложной цепи. Условимся токи, приходящие к узлу, считать положительными, а токи, уходящие от узла, — отрицательными. Тогда в соответствии с (1.15) можно написать уравнение

$$I_1 + (-I_2) + I_3 + I_4 = 0.$$

Если токи, имеющие знак минус, перенести в правую часть уравнения, то получим

$$I_1 + I_3 + I_4 = I_2.$$

Последнее равенство позволяет дать первому закону Кирхгофа несколько иную формулировку: сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, уходящих от узла.

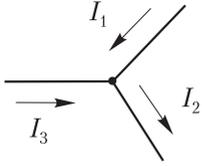
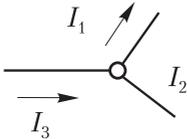
Карточка № 1.8 (331)

Сложная электрическая цепь, основные определения.

Первый закон Кирхгофа

<p>Сколько в этой электрической цепи:</p> <p>а) узлов; б) ветвей?</p>	а) 3; б) 7	164
	а) 4; б) 6	54
	а) 4; б) 5	165
	а) 4; б) 4	53
<p>Сколько контуров в цепи, изображенной выше?</p>	7	166
	3	52
	5	167
	6	51

Продолжение карт. № 1.8

 <p> $I_1 = -5 \text{ A};$ $I_2 = 2 \text{ A}.$ Найдите I_3. </p>	7 А	168
	3 А	50
	- 3 А	169
	- 7 А	49
 <p> $I_3 = 10 \text{ A};$ $I_1 = 5 \text{ A}.$ Определите действительное направление тока I_2 (направление движения положительных зарядов). </p>	От узла	170
	К узлу	48
	Задача не определена	171
Приборы показывают, что к узлу притекают токи 3 А и 8 А, а утекают токи 5 А и 7 А. Сколько ветвей сходится в узле?	3	47
	4	172
	5	46
	Не менее пяти	173

1.9. Второй закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: в любом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в контур:

$$\sum E = \sum IR. \quad (1.16)$$

Отсюда следует также, что падение напряжения на каком-либо участке контура равно сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в этот участок.

При записи уравнения (1.16) необходимо произвольно выбрать направление обхода контура; токи и ЭДС, направление которых совпадает с выбранным направлением обхода, считать положительными, а токи и ЭДС, направление которых противоположно направлению обхода контура, считать отрицательными.

Например, обходя контур $abdfa$ против часовой стрелки, запишем (см. рис. 1.7):

$$0 = I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_5 R_5 + I_6 R_6;$$

обходя контур $bcd b$ по часовой стрелке, запишем

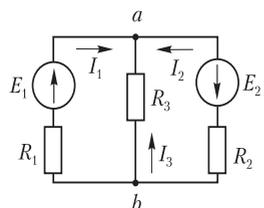
$$-E = -I_2 R_2 - I_5 R_5$$

и т.д. для всех контуров.

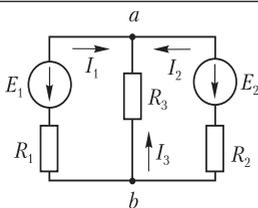
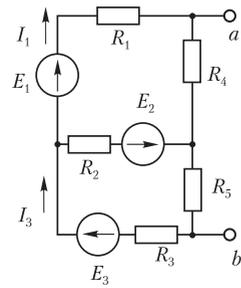
Второй закон Кирхгофа выражает тот факт, что в потенциальном поле работа сил поля, совершаемая при обходе зарядом замкнутого контура, равна нулю.

Карточка № 1.9 (282)

Второй закон Кирхгофа

 <p>Какие из величин I_1, I_2, I_3, E_1, E_2 войдут в уравнения второго закона Кирхгофа со знаком минус?</p>	E_1, I_1	174
	E_2, I_2	45
	I_3	175
В какой строке уравнения второго закона Кирхгофа для изображенной выше цепи записаны правильно?	Это зависит от выбора направления обхода контуров электрической цепи	44
	$E_1 = I_1 R_1 - I_3 R_3; E_2 = -I_2 R_2 + I_3 R_3$	176
	$-E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3; E_2 = I_3 R_3 - I_2 R_2$	43
	$-E_1 = -I_1 R_1 + I_3 R_3; E_2 = -I_2 R_2$	177

Продолжение карт. № 1.9

$E_1 = 110 \text{ В};$ $R_1 = 1 \text{ Ом};$ $I_1 = 10 \text{ А}.$ Найдите напряжение между точками ab изображенной выше цепи.	120 В	42
	110 В	178
	100 В	41
	Задача не определена, так как неизвестны R_3, I_3	179
 $E_2 = 24 \text{ В};$ $R_2 = 1 \text{ Ом};$ $I_2 = 6 \text{ А}.$ Определите U_{ba} .	18 В	40
	24 В	180
	30 В	39
	Для решения задачи недостаточно данных	181
 $I_1 = 5 \text{ А};$ $I_3 = 10 \text{ А};$ $R_4 = 2 \text{ Ом};$ $R_5 = 3 \text{ Ом}.$ Определите U_{ba} .	20 В	38
	40 В	182
	-40 В	37
	Для решения задачи недостаточно данных	183

1.10. Эквивалентное преобразование участков цепи, содержащих последовательно и параллельно соединенные сопротивления

Преобразование участка цепи называется эквивалентным, если при таком преобразовании токи и напряжения в остальных (не преобразованных) участках цепи не меняются.

На рис. 1.9. изображены два последовательно соединенных сопротивления R_1 , R_2 и эквивалентное им сопротивление R .

На основании второго закона Кирхгофа для схемы 1.9, а получаем

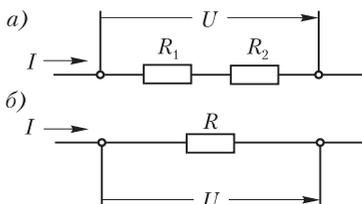


Рис. 1.9

$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2).$$

На основании закона Ома для схемы 1.9, б справедливо

$$U = IR.$$

Поскольку в обоих случаях токи одинаковы и напряжения одинаковы, то из последних выражений следует

$$R = R_1 + R_2.$$

Нетрудно видеть, что характер рассуждений не изменится при любом числе n последовательно соединенных сопротивлений. Таким образом,

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (1.17)$$

На рис. 1.10 изображены два параллельно соединенных сопротивления R_1 , R_2 и эквивалентное им сопротивление R .

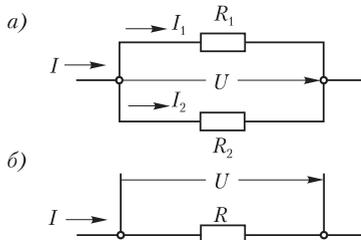


Рис. 1.10

На основании первого закона Кирхгофа для схемы 1.10, *a* получаем

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) U.$$

Для схемы 1.10, *б* на основании закона Ома можно написать

$$I = \frac{U}{R}.$$

Поскольку в обоих случаях токи и напряжения одинаковы, то из последних выражений следует

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} \text{ или } G_1 + G_2 = G. \quad (1.18)$$

Нетрудно видеть, что характер рассуждений не изменится при любом числе n параллельно соединенных сопротивлений. Таким образом,

$$G_1 + G_2 + \dots + G_n = G. \quad (1.19)$$

В частном случае двух параллельно соединенных сопротивлений удобно, не переходя к проводимостям, использовать формулу (1.18), записанную в следующем виде:

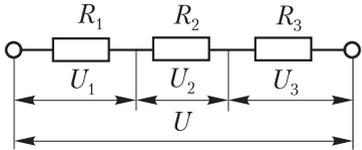
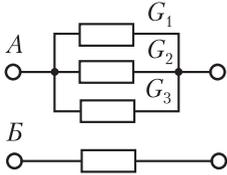
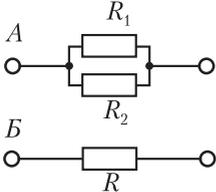
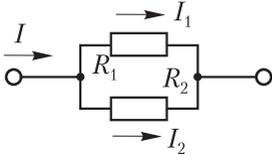
$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.20)$$

Кроме того, для этого случая имеем:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{IR}{R_1} = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{IR}{R_2} = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \end{aligned} \quad (1.20a)$$

Карточка № 1.10 (282)

Эквивалентное преобразование участков цепи, содержащих последовательно и параллельно соединенные сопротивления

<p>Изменяются ли токи и напряжения при эквивалентных преобразованиях в цепи: а) в преобразованных ветвях; б) на непреобразованных участках цепи?</p>	а) Да; б) нет	36
	а) Нет; б) нет	184
	а) Да; б) да	35
	а) Нет; б) да	185
 <p>$U = 110 \text{ В}; R_1 = 2 \text{ Ом}; R_2 = 4 \text{ Ом}; R_3 = 5 \text{ Ом}.$ Найдите U_1, U_2, U_3.</p>	20 В; 40 В; 50 В	34
	Для решения задачи недостаточно данных	186
 <p>$G_1 = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$ $G_2 = 0,2 \text{ Ом}^{-1};$ $G_3 = 0,3 \text{ Ом}^{-1}.$</p> <p>Участки цепи <i>A</i> и <i>B</i> эквивалентны. Найдите проводимость участка <i>B</i>.</p>	$0,6 \text{ Ом}^{-1}$	33
	$0,06 \text{ Ом}^{-1}$	187
	Для решения задачи недостаточно данных	32
 <p>$R_1 = 2 \text{ Ом};$ $R_2 = 6 \text{ Ом}.$</p> <p>Участки цепи <i>A</i> и <i>B</i> эквивалентны. Найдите R.</p>	8 Ом	188
	4 Ом	31
	1,5 Ом	189
 <p>$I = 16 \text{ А}; R_1 = 3 \text{ Ом}; R_2 = 5 \text{ Ом}.$ Найдите токи I_1 и I_2.</p>	$I_1 = 5 \text{ А}; I_2 = 3 \text{ А}$	30
	$I_1 = 10 \text{ А}; I_2 = 6 \text{ А}$	190
	$I_1 = 6 \text{ А}; I_2 = 10 \text{ А}$	29

1.11. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений и обратное преобразование звезды в треугольник

Участок схемы, имеющий вид треугольника, образованного тремя ветвями (рис. 1.11, *а*), не удастся заменить одним эквивалентным сопротивлением.

Во многих случаях расчет значительно упрощается, если соединение сопротивлений треугольником заменить трехлучевой звездой (рис. 1.11, *б*).

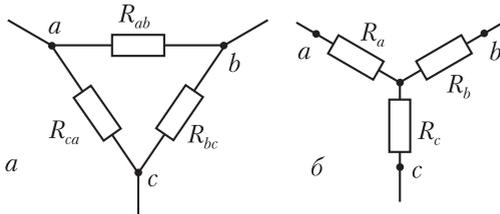


Рис. 1.11

Для того чтобы преобразование треугольника в звезду было эквивалентным, достаточно, чтобы сопротивления между точками ab , bc , ca треугольника были равны сопротивлениям между соответствующими точками звезды:

$$\frac{R_{ab}(R_{bc} + R_{ca})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = R_a + R_b; \quad \frac{R_{bc}(R_{ca} + R_{ab})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = R_b + R_c;$$

$$\frac{R_{ca}(R_{ab} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = R_c + R_a.$$

Эти уравнения позволяют выразить R_a , R_b , R_c через сопротивления R_{ab} , R_{bc} , R_{ca} и обратно R_{ab} , R_{bc} , R_{ca} через сопротивления R_a , R_b , R_c .

Соответствующие формулы имеют вид:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \quad R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}};$$

$$R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \quad (1.21)$$

И обратно:

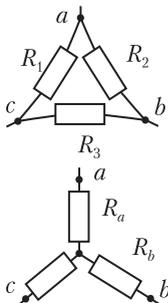
$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}; \quad R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a};$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}. \quad (1.22)$$

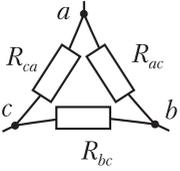
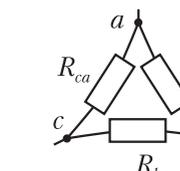
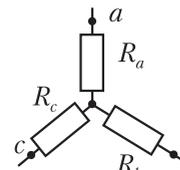
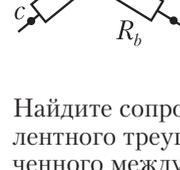
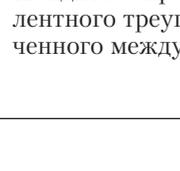
При расчетах цепей следует помнить, что приведенные формулы преобразований справедливы только для участков цепей, не содержащих ЭДС.

Карточка № 1.11 (473)

Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений и обратное преобразование звезды в треугольник

 <p>Звезда и треугольник эквивалентны. Найдите сопротивление между точками ab звезды.</p>	$R_1 = 1 \text{ Ом};$ $R_2 = 2 \text{ Ом};$ $R_3 = 5 \text{ Ом}.$	1,5 Ом	191
		2 Ом	28
		Для решения задачи недостаточно данных	192
<p>Для предыдущего случая найдите R_a и R_b.</p>		$R_a = 0,5 \text{ Ом};$ $R_b = 1 \text{ Ом}$	27
		$R_a = 0,25 \text{ Ом};$ $R_b = 1,25 \text{ Ом}$	193
		$R_a = 1 \text{ Ом};$ $R_b = 0,5 \text{ Ом}$	26
		$R_a = 0,75 \text{ Ом};$ $R_b = 1,25 \text{ Ом}$	194

Продолжение карт. № 1.11

 <p>Найдите сопротивление лучей эквивалентной звезды.</p>	$R_{ab} = 1 \text{ Ом};$ $R_{bc} = 2 \text{ Ом};$ $R_{ca} = 3 \text{ Ом}.$	$R_a = 3/5 \text{ Ом};$ $R_b = 2/5 \text{ Ом};$ $R_c = 6/5 \text{ Ом}$	25
 <p>Найдите сопротивление лучей эквивалентной звезды.</p>	$R_a = 1/2 \text{ Ом};$ $R_b = 1/3 \text{ Ом};$ $R_c = 1 \text{ Ом}$	$R_a = 2/6 \text{ Ом};$ $R_b = 3/6 \text{ Ом};$ $R_c = 5/6 \text{ Ом}$	195
 <p>Найдите сопротивление лучей эквивалентной звезды.</p>	$R_a = R_b = R_c = 2 \text{ Ом}$	$R_a = R_b = R_c = 3 \text{ Ом}$	24
 <p>Найдите сопротивление лучей эквивалентной звезды.</p>	$R_a = R_b = R_c = 6 \text{ Ом}.$	$R_a = 2 \text{ Ом};$ $R_b = 4 \text{ Ом};$ $R_c = 6 \text{ Ом}$	196
 <p>Найдите сопротивление эквивалентного треугольника, включенного между точками abc.</p>	$R_a = 1 \text{ Ом};$ $R_b = 2 \text{ Ом};$ $R_c = 3 \text{ Ом}.$	$R_{ab} = 4 \text{ Ом};$ $R_{bc} = 3^2/3 \text{ Ом};$ $R_{ca} = 11^1/3 \text{ Ом}$	22
 <p>Найдите сопротивление эквивалентного треугольника, включенного между точками abc.</p>	$R_{ab} = 3^2/3 \text{ Ом};$ $R_{bc} = 11 \text{ Ом};$ $R_{ca} = 5^1/2 \text{ Ом}$	$R_{ab} = 3^1/3 \text{ Ом};$ $R_{bc} = 11^1/2 \text{ Ом};$ $R_{ca} = 11^1/2 \text{ Ом}$	198
 <p>Найдите сопротивление эквивалентного треугольника, включенного между точками abc.</p>	$R_{ab} = 3^1/3 \text{ Ом};$ $R_{bc} = 11^1/2 \text{ Ом};$ $R_{ca} = 11^1/2 \text{ Ом}$		21

1.12. Расчет электрической цепи с одним источником питания

Обычно известны величина ЭДС и сопротивления ветвей. Задача сводится к определению токов.

Порядок расчета следующий:

- методом эквивалентных преобразований схема приводится к одноконтурной цепи;
- на основании закона Ома для замкнутой цепи определяется ток источника электроэнергии (ток в неразветвленной части цепи);
- последовательно определяются напряжения и токи в ветвях исходной схемы.

В качестве примера рассмотрим расчет цепи, изображенной на рис. 1.12, а.

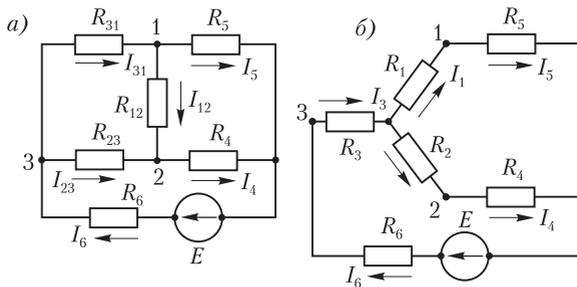


Рис. 1.12

1. Треугольник, образованный сопротивлениями R_{12} , R_{23} , R_{31} , преобразуем в звезду R_1 , R_2 , R_3 (рис. 1.12, б), используя формулы (1.21).

2. Используя формулы (1.17) и (1.20), определяем эквивалентное сопротивление всей цепи:

$$R = R_3 + R_6 + \frac{(R_1 + R_5)(R_2 + R_4)}{R_1 + R_5 + R_2 + R_4}.$$

3. Определяем ток $I_3 = I_6$ в неразветвленной части цепи:

$$I = I_6 = \frac{E}{R}.$$

4. Используя соотношения (1.20, а), определяем токи $I_1 = I_5$ и $I_2 = I_4$:

$$I_1 = I_5 = I_3 \frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_5 + R_2 + R_4};$$

$$I_2 = I_4 = I_3 \frac{R_1 + R_5}{R_1 + R_5 + R_2 + R_4}.$$

5. Определяем напряжения между точками 1, 2, 3:

$$U_{12} = -I_1 R_1 + I_2 R_2; \quad U_{23} = -I_2 R_2 - I_3 R_3;$$

$$U_{31} = I_3 R_3 + I_1 R_1.$$

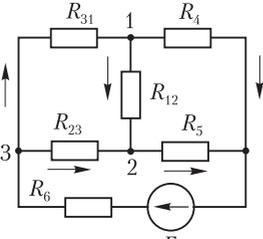
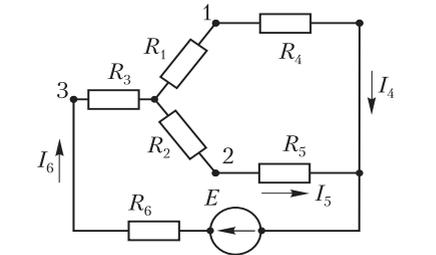
6. Определяем токи I_{12} , I_{23} , I_{31} :

$$I_{12} = \frac{U_{12}}{R_{12}}; \quad I_{23} = \frac{U_{32}}{R_{23}} = \frac{U_{23}}{R_{23}};$$

$$I_{31} = \frac{U_{31}}{R_{31}}.$$

Карточка № 1.12 (65)

Расчет электрической цепи с одним источником питания

 <p> $R_{12} = 1 \text{ Ом};$ $R_{23} = 2 \text{ Ом};$ $R_{31} = 3 \text{ Ом};$ $R_4 = 0,5 \text{ Ом};$ $R_5 = 2/3 \text{ Ом};$ $R_6 = 10 1/2 \text{ Ом};$ $E = 24 \text{ В}.$ </p> <p>Замените треугольник сопротивлений R_{12}, R_{23}, R_{31} эквивалентной звездой.</p>	$R_1 = 1/4 \text{ Ом};$ $R_2 = 2/3 \text{ Ом};$ $R_3 = 2 \text{ Ом}$	199
	$R_1 = 1/2 \text{ Ом};$ $R_2 = 1/3 \text{ Ом};$ $R_3 = 1 \text{ Ом}$	20
	$R_1 = 3/4 \text{ Ом};$ $R_2 = 3/2 \text{ Ом};$ $R_3 = 3/5 \text{ Ом}$	200
 <p>Определите ток в неразветвленной части цепи I_6.</p>	$I_6 = 1 \text{ А}$	19
	$I_6 = 2 \text{ А}$	201
	$I_6 = 3 \text{ А}$	18
	$I_6 = 4 \text{ А}$	202

Продолжение карт. № 1.12

Определите токи I_4, I_5 .	$I_4 = 1 \text{ A};$ $I_5 = 1 \text{ A}$	17
	$I_4 = 2 \text{ A};$ $I_5 = 2 \text{ A}$	203
	$I_4 = 0,5 \text{ A};$ $I_5 = 0,5 \text{ A}$	16
	$I_4 = 0,5 \text{ A};$ $I_5 = 1,5 \text{ A}$	204
Определите напряжения между точками 1, 2, 3, считая, что направление напряжения соответствует порядку индексов (например, U_{21} направлено от точки 2 к точке 1).	$U_{12} = 1/3 \text{ В};$ $U_{32} = 2 \frac{2}{3} \text{ В};$ $U_{31} = 1/2 \text{ В}$	15
	$U_{21} = 2/3 \text{ В};$ $U_{32} = 3 \frac{2}{3} \text{ В};$ $U_{31} = 2 \frac{2}{3} \text{ В}$	205
	$U_{21} = 1/6 \text{ В};$ $U_{32} = 2 \frac{1}{3} \text{ В};$ $U_{31} = 2 \frac{1}{2} \text{ В}$	14
Определите токи, протекающие через сопротивления R_{12}, R_{23}, R_{31} (направления токов показаны стрелками на верхнем рисунке).	$I_{12} = 1/3 \text{ А};$ $I_{32} = 5/6 \text{ А};$ $I_{31} = 2/3 \text{ А}$	206
	$I_{12} = 1/6 \text{ А};$ $I_{32} = 7/6 \text{ А};$ $I_{31} = 5/6 \text{ А}$	13
	$I_{12} = 1/2 \text{ А};$ $I_{32} = 11/6 \text{ А};$ $I_{31} = 5/3 \text{ А}$	207

1.13. Расчет электрической цепи с несколькими источниками питания методом наложения

В основе этого метода лежит принцип наложения, согласно которому ток в любой ветви линейной электрической цепи можно рассматривать как сумму токов, создаваемые в этой ветви каждой из ЭДС.

Рассмотрим порядок расчета цепи методом наложения:

- из схемы удаляются все источники питания, кроме первого, при этом внутренние сопротивления источников сохраняются в соответствующих ветвях;

- по методике, рассмотренной ранее, производится расчет получившейся цепи с одним источником ЭДС: определяются токи в ветвях, создаваемые первым источником питания:

- из схемы удаляются все источники питания, кроме второго, и определяются токи в ветвях, создаваемые вторым источником питания;

- аналогично определяются токи, создаваемые всеми другими источниками питания;

- найденные токи ветвей складываются с учетом знаков.

В качестве примера рассмотрим расчет цепи, изображенной на рис. 1.13, *а*.

1. Исключаем из рассмотрения ЭДС E_2 и определяем токи I_1', I_2', I_3' , создаваемые ЭДС E_1 (рис. 1.13, *б*):

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}; \quad I_2' = I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3}; \quad I_3' = I_1' \frac{R_2}{R_2 + R_3}.$$

2. Исключаем из рассмотрения ЭДС E_1 и определяем токи I_1'', I_2'', I_3'' , создаваемые ЭДС E_2 (рис. 1.13, *в*):

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}}; \quad I_1'' = I_2'' \frac{R_3}{R_1 + R_3}; \quad I_3'' = I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3}.$$

3. Накладываем друг на друга схемы, изображенные на рис. 1.13, *б* и 1.13, *в*; получаем исходную расчетную схему, изображенную на рис. 1.13, *а*. При этом реальные токи в ветвях определяем как алгебраическую сумму токов, создаваемых каждой из ЭДС:

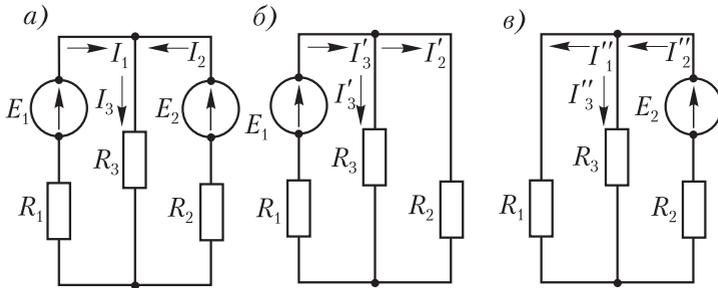


Рис. 1.13

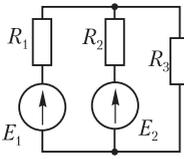
$$I_1 = I_1' - I_1'';$$

$$I_2 = I_2'' - I_2';$$

$$I_3 = I_3' + I_3''.$$

Карточка № 1.13 (47)

Расчет электрической цепи с несколькими источниками питания методом наложения

 <p> $E_1 = 24 \text{ В};$ $E_2 = 12 \text{ В};$ $R_3 = R_1 = 2 \text{ Ом};$ $R_2 = 1 \text{ Ом}.$ </p> <p>Определите ток I_1', создаваемый ЭДС E_1 в сопротивлении R_1.</p>	$I_1' = 7 \text{ А}$	12
	$I_1' = 8 \text{ А}$	208
	$I_1' = 9 \text{ А}$	11
	$I_1' = 10 \text{ А}$	209
<p>Определите токи I_1', I_2', создаваемые ЭДС E_1 в сопротивлениях R_1 и R_2.</p>	$I_1' = 3 \text{ А};$ $I_2' = 4 \text{ А}$	10
	$I_1' = 3 \text{ А};$ $I_2' = 6 \text{ А}$	210
	$I_1' = 4 \text{ А};$ $I_2' = 6 \text{ А}$	9
	$I_1' = 6 \text{ А};$ $I_2' = 2 \text{ А}$	211

Продолжение карт. № 1.13

Определите ток I_2'' , создаваемый ЭДС E_2 в сопротивлении R_2 .	$I_2'' = 6 \text{ A}$	8
	$I_2'' = 7 \text{ A}$	212
	$I_2'' = 8 \text{ A}$	7
	$I_2'' = 9 \text{ A}$	213
Определите токи I'' , I_1'' , создаваемые ЭДС E_2 в сопротивлениях R и R_1 .	$I'' = 4 \text{ A};$ $I_1'' = 4 \text{ A}$	6
	$I'' = 3 \text{ A};$ $I_1 = 3 \text{ A}$	214
	$I'' = 4,5 \text{ A};$ $I_1 = 4,5 \text{ A}$	5
	$I'' = 4 \text{ A};$ $I_1 = 5 \text{ A}$	215
Определите токи I , I_1 , I_2 , протекающие в сопротивлениях R , R_1 , R_2 при действии двух ЭДС.	$I = 6 \text{ A};$ $I_1 = 6 \text{ A};$ $I_2 = 0$	4
	$I = 3 \text{ A};$ $I_1 = 3 \text{ A};$ $I_2 = 6 \text{ A}$	216
	$I = 4 \text{ A};$ $I_1 = 8 \text{ A};$ $I_2 = 0$	3
	$I = 8 \text{ A};$ $I_1 = 8 \text{ A};$ $I_2 = 0$	217

1.14. Порядок расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа

Уравнения Кирхгофа позволяют произвести расчет или исследовать режимы работы любой электрической цепи, какой бы сложной она ни была. Чтобы сократить количество уравнений в системе, целесообразно предварительно произвести, если это возможно, эквивалентное преобразование

ветвей, не содержащих ЭДС (объединить параллельные ветви, преобразовать треугольник сопротивлений в звезду или, наоборот, звезду в треугольник).

Целесообразно принять следующий порядок расчета:

— произвольно задаться направлениями токов в ветвях (позначить на схеме стрелки токов);

— составить n уравнений второго закона Кирхгофа для независимых контуров схемы, т.е. таких контуров, которые содержат хотя бы одну ветвь, не входящую в другие выбранные контуры;

— составить $(m - 1)$ уравнений первого закона Кирхгофа (m — число узлов в схеме);

— полученную систему линейных уравнений решить относительно токов известными из математики методами.

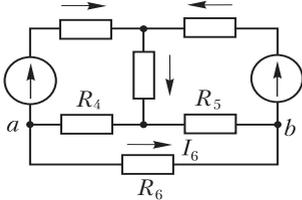
Если в результате решения системы некоторые токи получатся со знаком минус, то это означает, что в действительности токи текут в направлениях, обратных указанным на схеме. Таким образом, законы Кирхгофа позволяют найти формальным путем не только величины, но и направления токов в схеме.

Следует отметить, что непосредственное применение законов Кирхгофа к расчету сложных электрических цепей приводит к системам, содержащим большое количество уравнений. Решение таких систем уравнений требует много труда и времени. Чтобы упростить вычисления, на основе законов Кирхгофа разработаны специальные методы, которые мы не рассматриваем.

Если решение системы уравнений не представляет трудностей (например, при наличии быстродействующей вычислительной техники), то цепь целесообразно рассчитывать непосредственно методом уравнений Кирхгофа.

Карточка № 1.14 (87)

Порядок расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа

<p>Правильно ли указаны действительные направления токов в ветвях схемы?</p> 	Правильно	2
	Неправильно	218
	Без расчета это определить невозможно	1

Продолжение карт. № 1.14

а) Сколько в цепи, изображенной выше, независимых контуров? б) Сколько уравнений второго закона Кирхгофа нужно составить для расчета этой цепи?	а) 7; б) 3	219
	а) 3; б) 3	321
	а) 3; б) 4	220
	а) 4; б) 7	320
Сколько уравнений первого закона Кирхгофа нужно составить для расчета этой цепи?	3	221
	4	319
	5	222
	6	318
В результате расчета изображенной выше цепи найдено, что ток I_6 равен -5 А. Какая из точек a, b имеет более высокий потенциал?	Точка a	223
	Точка b	319
	Для решения задачи приведенных данных недостаточно	224
Сколько уравнений будет иметь система, если схему, изображенную выше, предварительно упростить методом эквивалентных преобразований?	2	318
	3	225
	4	317
	5	226

1.15. Пример расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа

Рассчитаем схему, изображенную на рис. 1.14, а.

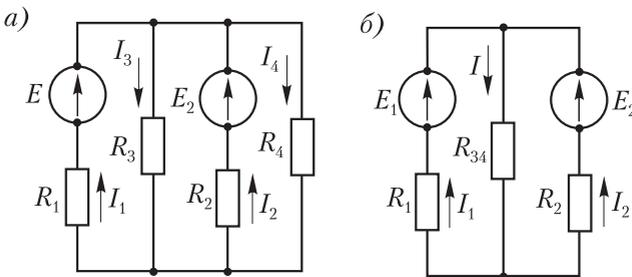


Рис. 1.14

Замечаем, что сопротивления R_3 и R_4 соединены параллельно и заменяем их одним эквивалентным сопротивлением R_{34} (рис. 1.14, б).

Обходя контуры по часовой стрелке, записываем уравнения второго закона Кирхгофа. При этом ЭДС и токи, совпадающие по направлению с направлением обхода контура, считаем положительными, а направленные навстречу — отрицательными:

$$\begin{aligned} E_1 &= R_1 I_1 + R_{34} I; \\ -E_2 &= -R_2 I_2 - R_{34} I. \end{aligned}$$

3. В схеме два узла; для одного из них записываем уравнение первого закона Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 = I.$$

4. Таким образом, мы составили систему трех линейных уравнений для определения трех неизвестных токов:

$$\begin{aligned} R_1 I_1 + R_{34} I &= E_1; \\ R_2 I_2 + R_{34} I &= E_2; \\ I_1 + I_2 - I &= 0. \end{aligned}$$

Решим эту систему при помощи детерминантов. Главный определитель системы имеет вид:

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_1 & 0 & R_{34} \\ 0 & R_2 & R_{34} \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -R_1 R_2 - R_2 R_{34} + R_1 R_{34}.$$

Далее находим:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} E_1 & 0 & R_{34} \\ E_2 & R_2 & R_{34} \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} R_1 & E_1 & R_{34} \\ 0 & E_2 & R_{34} \\ 1 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} R_1 & 0 & E_1 \\ 0 & R_2 & E_2 \\ 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Искомые токи определяются отношениями

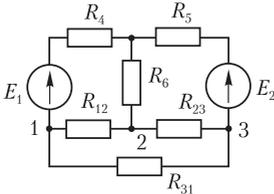
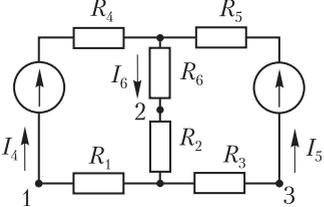
$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad I = \frac{\Delta_3}{\Delta}.$$

Возвращаясь к исходной схеме, определяем также токи I_3, I_4 :

$$I_3 = I \frac{R_4}{R_3 + R_4}; \quad I_4 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} I.$$

Карточка № 1.15 (98)

Пример расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа

 <p> $R_4 = 1 \text{ Ом}; R_5 = 1 \text{ Ом};$ $R_6 = 1 \text{ Ом}; R_{12} = R_{23} = R_{31} = 3 \text{ Ом};$ $E_1 = 12 \text{ В};$ $E_2 = 24 \text{ В}.$ Определите сопротивления ветвей звезды, эквивалентной треугольнику сопротивлений R_{12}, R_{23}, R_{31}. </p>	$R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ Ом}$	316
	$R_1 = 1 \text{ Ом};$ $R_2 = 2 \text{ Ом};$ $R_3 = 3 \text{ Ом}$	227
	$R_1 = 3 \text{ Ом};$ $R_2 = 2 \text{ Ом};$ $R_3 = 1 \text{ Ом}$	315
Составьте уравнения Кирхгофа для этой схемы. 	$\begin{cases} 2I_4 + 2I_6 = 12; \\ 2I_5 + 2I_6 = 24; \\ I_4 + I_5 - I_6 = 0 \end{cases}$	228
	$\begin{cases} 2I_4 + 2I_6 - 2I_5 = 12; \\ 2I_5 + 2I_6 - 2I_4 = 24; \\ I_5 - I_6 + I_4 = 0 \end{cases}$	314
Найдите главный определитель системы Δ .	4	229
	-4	313
	-8	230
	-12	312
Найдите определитель Δ_5 , заменив в Δ столбец коэффициентов при I_5 правыми частями уравнений.	-72	231
	-36	313
	-12	232
	36	312

Продолжение карт. № 1.15

Определите ток I_5 .	9	233
	6	311
	3	234
	0	310

1.16. Проверка правильности расчета. Баланс мощностей

При расчете сложных цепей приходится проделывать большую вычислительную работу. Ошибка, совершенная на каком-либо этапе расчета, обычно делает все последующие вычисления недействительными. Поэтому каждую возможность проверки необходимо использовать уже в ходе расчета. Так, например, определив токи в ветвях, образующих контур, следует проверить, выполняется ли второй закон Кирхгофа при найденных числовых значениях; определив токи в ветвях, сходящихся в узле, надо сразу проверить, выполняется ли первый закон Кирхгофа. Указанные проверки необходимы, но недостаточны.

Правильность законченного расчета обязательно должна быть проверена методом баланса мощностей. Из закона сохранения энергии следует, что мощность, отдаваемая источниками питания, должна равняться мощности, потребляемой сопротивлениями ветвей. Следовательно, при правильном расчете цепи должно быть справедливым следующее равенство:

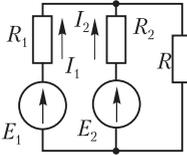
$$E_1 I_1 + E_2 I_2 + \dots + E_k I_k = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \dots + I_n^2 R_n.$$

Здесь произведение вида $E_k I_k$ выражает мощность k -го источника ЭДС. Если направления E_k и I_k совпадают, источник отдает мощность в сеть. Если E_k и I_k направлены встречно, источник потребляет мощность (например, аккумуляторная батарея в режиме заряда) и произведение $E_k I_k$ входит в левую часть уравнения со знаком минус.

Произведения вида $I_n^2 R_n$ выражают мощность, выделяющуюся в сопротивлении n -й ветви. Эти произведения всегда положительны.

Карточка № 1.16 (121)

Проверка правильности расчета. Баланс мощностей

 <p> $E_1 = 24 \text{ В};$ $E_2 = 12 \text{ В};$ $R_3 = R_1 = 2 \text{ Ом};$ $R_2 = 1 \text{ Ом}.$ </p> <p> $I_1 = 6 \text{ А}; I_2 = 0; I = 6 \text{ А}.$ </p>	Выполняется	235
	Нет	309
Выполняется ли второй закон Кирхгофа для контуров схемы?	Выполняется	236
	Нет	308
	Выполняется, но не для всех контуров	237
Определите мощность, отдаваемую источниками.	36 Вт	307
	72 Вт	238
	144 Вт	306
Определите мощность, потребляемую цепью.	36 Вт	239
	72 Вт	305
	144 Вт	240
Правильно ли выполнен расчет изображенной выше цепи?	Правильно	304
	Неправильно	241

1.17. Линейные и нелинейные электрические цепи

Электрическая цепь называется линейной, если она не содержит нелинейных элементов. Нелинейным элементом

называется такой элемент, сопротивление которого зависит или от тока, или от напряжения. Основной характеристикой нелинейного элемента служит так называемая вольт-амперная характеристика, представляющая собой зависимость напряжения на зажимах нелинейного элемента от тока, протекающего по нему. В нелинейном элементе зависимость между током и напряжением не подчиняется закону Ома.

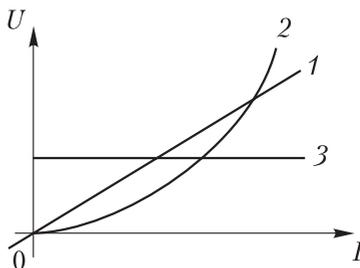


Рис. 1.15

На рис. 1.15 приведены вольт-амперные характеристики элементов электрической цепи. Характеристики 2 и 3 относятся к нелинейным элементам, прямая 1, проходящая через начало координат, характеризует линейный элемент.

Примером нелинейного элемента служит нить накаливания электрической лампы: с увеличением тока, протекающего по нити, увеличивается ее нагрев и возрастает сопротивление. Вольт-амперная характеристика вольфрамовой нити накаливания лампы имеет вид кривой 2, приведенной на рис. 1.15. В качестве другого примера нелинейного элемента можно назвать любой выпрямитель переменного тока.

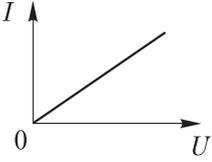
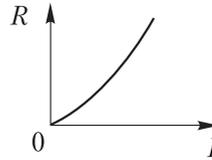
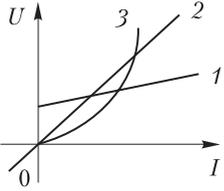
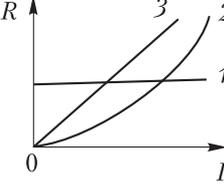
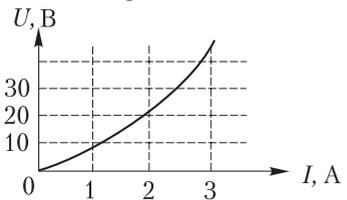
Сопротивление нелинейного элемента может быть определено по вольт-амперной характеристике, которая обычно строится на основе экспериментальных данных.

$$R \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}; \quad R = \frac{dU}{dI}.$$

Цепи с нелинейными элементами рассчитываются, как правило, графоаналитическими методами на основе вольт-амперных характеристик ветвей и законов Кирхгофа. Метод наложения и вытекающие из него следствия к нелинейным электрическим цепям неприменимы.

Карточка № 1.17 (233)

Линейные и нелинейные электрические цепи

Какая из приведенных кривых является вольт-амперной характеристикой?		303
		242
Укажите характеристику линейного элемента.	1	302
	2	243
	3	301
Укажите характеристику линейного элемента.	1	244
	2	300
	3	245
Найдите примерное значение сопротивления нелинейного элемента при токе 1,5 А.	5 Ом	299
	10 Ом	246
	20 Ом	298
	15 Ом	247

Продолжение карт. № 1.17

Измерения тока и напряжения на участке цепи дали следующие результаты: I a 1 2 3 4 5 U b 2 5 9 14 20 Содержит ли этот участок цепи нелинейный элемент?	Да	297
	Нет	248
	Для определенного вывода недостаточно данных	296

1.18. Расчет простейших цепей с нелинейными сопротивлениями

Пусть источник ЭДС E с внутренним сопротивлением R_0 питает два соединенных последовательно нелинейных сопротивления НС1 и НС2 (рис. 1.16, а).

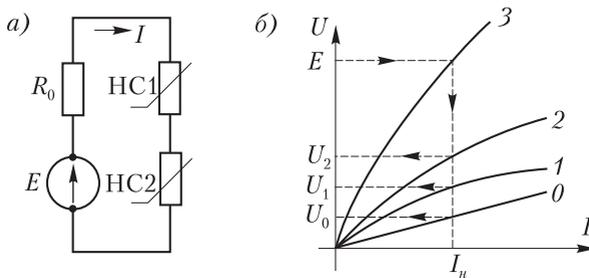


Рис. 1.16

Известны E , R_0 , вольт-амперная характеристика 1 нелинейного сопротивления НС1 и вольт-амперная характеристика 2 нелинейного сопротивления НС2 (рис. 1.16, б).

Требуется определить ток в цепи I_n , падение напряжения на внутреннем сопротивлении R_0 и напряжения на нелинейных элементах.

Прежде всего построим вольт-амперную характеристику линейного сопротивления R_0 . Это будет прямая, проходящая через начало координат, $\text{tg} \alpha = R_0$ (см. рис. 1.16, б).

Напряжение, падающее на сопротивлениях контура, определяется выражением

$$U = IR_0 + IR_1 + IR_2.$$

Построим зависимость $U = f(I)$. Для этого достаточно сложить графически вольт-амперные характеристики $0, 1, 2$, суммируя ординаты, соответствующие одной абсциссе, затем другой абсциссе т.д. В результате получим кривую 3 (см. рис. 1.16, б). Кривая 3 представляет собой вольт-амперную характеристику всей цепи. Используя эту вольт-амперную характеристику, находим ток в цепи I_n , соответствующий напряжению $U = E$.

Затем, используя найденное значение тока, по вольт-амперным характеристикам $0, 1$ и 2 находим искомые напряжения U_0, U_1, U_2 .

Пусть (рис. 1.17, а) источник ЭДС E с внутренним сопротивлением R_0 питает два соединенных параллельно нелинейных сопротивления НС1 и НС2, вольт-амперные характеристики которых 1 и 2 известны (рис. 1.17, б).

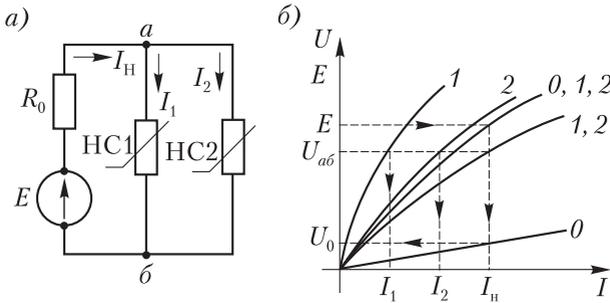


Рис. 1.17

Требуется определить токи I_1, I_2, I_n , напряжение U_{ab} между точками a и b и внутреннее падение напряжения U_0 .

Задачу решаем в следующей последовательности.

1. Строим вольт-амперную характеристику $I_n = f(U_{ab})$. Для этого складываем графически вольт-амперные характеристики 1 и 2 , суммируя абсциссы, соответствующие одной ординате, затем другой ординате и т.д.

2. Строим вольт-амперную характеристику всей цепи (кривая $0, 1, 2$ на рис. 1.17, б). Для этого складываем графически вольт-амперные характеристики 0 и $1, 2$, суммируя ординаты, соответствующие определенным абсциссам.

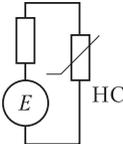
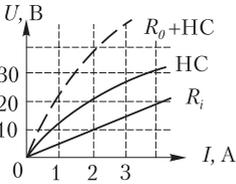
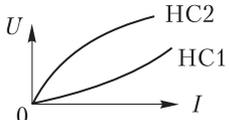
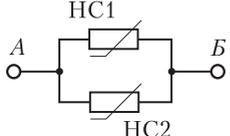
По вольт-амперной характеристике всей цепи находим ток I_n , соответствующий $U = E$.

Используя вольт-амперную характеристику 1, 2, определяем напряжение U_{ab} , соответствующее найденному току I_n , и внутреннее падение напряжения U_0 , соответствующее этому току.

Наконец, используя вольт-амперные характеристики 1 и 2, определяем токи I_1 и I_2 , соответствующие найденному значению U_{ab} .

Карточка № 1.18 (239)

Расчет простейших цепей с нелинейными сопротивлениями

<p>Определите ток в цепи и падение напряжения на R_0, если ЭДС $E = 40$ В.</p>  	<p>$I = 1$ А; $U_0 = 20$ В</p>	<p>295</p>
	<p>$I = 2$ А; $U_0 = 10$ В</p>	<p>249</p>
	<p>$I = 3$ А; $U_0 = 5$ В</p>	<p>294</p>
	<p>Для решения задачи недостаточно данных</p>	
<p>Даны вольт-амперные характеристики НС1 и НС2. Как построить вольт-амперную характеристику участка АБ?</p>  	<p>Сложить ординаты данных характеристик, соответствующие одним и тем же абсциссам</p>	<p>293</p>
	<p>Сложить абсциссы данных характеристик, соответствующие одним и тем же ординатам</p>	
<p>Те же элементы НС1 и НС2 соединены параллельно. Как построить вольт-амперную характеристику участка АБ?</p> 	<p>Сложить абсциссы данных характеристик, соответствующие одним и тем же ординатам</p>	<p>292</p>
	<p>Сложить ординаты данных характеристик, соответствующие одним и тем же абсциссам</p>	

Продолжение карт. № 1.18

Почему при последовательном соединении нелинейных элементов для построения результирующей характеристики надо складывать ординаты данных выше вольт-амперных характеристик?	Складывать ординаты удобней, чем складывать абсциссы	291
	Потому что напряжение между точками <i>АВ</i> равно сумме падений напряжений на <i>НС1</i> и <i>НС2</i>	103
Почему при параллельном соединении нелинейных элементов для построения результирующей характеристики надо складывать абсциссы данных выше вольт-амперных характеристик?	Потому что при параллельном соединении эквивалентная проводимость равна сумме проводимостей ветвей	290
	Потому что ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов, протекающих через <i>НС1</i> и <i>НС2</i>	102

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

2.1. Магнитное поле. Магнитная индукция

Опыт показывает, что два проводника по которым текут электрические токи, воздействуют друг на друга с некоторой механической силой F (рис. 2.1). Взаимодействие обнаруживается не только в среде, заполненной атомами и молекулами вещества, но и в вакууме. Ясно, что взаимодействие удаленных друг от друга проводников может осуществляться только посредством некоторой материальной субстанции. Этот особый вид материи принято называть магнитным полем.

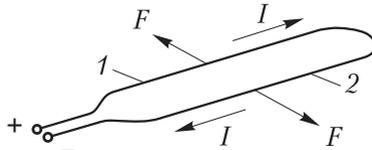


Рис. 2.1

Каждый из проводников 1 и 2 (см. рис. 2.1), по которым протекает ток I , создает свое магнитное поле. Результирующее реально существующее магнитное поле мы можем рассматривать как результат наложения магнитных полей всех движущихся зарядов.

Введя понятие магнитного поля, мы можем говорить не о взаимодействии проводников 1 и 2 между собой, а о взаимодействии каждого из проводников с магнитным полем, что больше соответствует реальной картине, так как непосредственно каждый из проводников соприкасается только с магнитным полем.

Магнитное поле всегда может быть обнаружено по силе, с которой оно действует на движущиеся заряженные части-

цы. Направление этой силы совпадает с перпендикуляром к направлению поля и к вектору скорости частицы в каждый момент времени.

На рис. 2.2 изображено магнитное поле, интенсивность которого характеризуется некоторой величиной B , называемой магнитной индукцией; в это магнитное поле помещен проводник, по которому протекает ток I .

Назовем активной длиной l проводника ту его часть, которая находится в магнитном поле. Через α обозначен угол между осью проводника и направлением магнитной индукции.

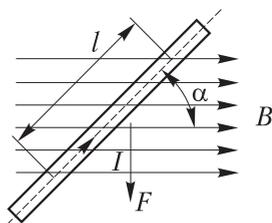


Рис. 2.2

$$F = IlB\sin\alpha; \quad F = IlB\sin\alpha. \quad (2.1)$$

Опыт показывает, что на прямолинейный проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует сила F , пропорциональная величине тока, активной длине проводника, величине магнитной индукции и синусу острого угла между осью проводника и направлением магнитной индукции.

Направление этой силы определяется правилом левой руки.

Формула (2.1) выражает физический закон, открытый французским физиком А. Ампером в 1820 г.

Нам уже известны понятия механической силы и силы тока, поэтому опытный закон Ампера позволяет совершенно естественно ввести понятие индукции магнитного поля B как величины, характеризующей вторую (кроме проводника с током) физическую реальность — магнитное поле, участвующую в создании механической силы.

В соответствии с формулой (2.1) магнитная индукция B равна механической силе, с которой однородное магнитное поле действует на каждый метр длины прямолинейного проводника, когда по нему течет ток силой I ампер и когда проводник расположен так, что указанная механическая сила максимальна ($\sin \alpha = 1$).

Механическая сила — векторная величина, следовательно, и индукция магнитного поля в каждой его точке должна изображаться вектором. Таким образом, вектор магнитной

индукции характеризует как интенсивность, так и направление магнитного поля.

В дифференциальной форме закон Ампера записывается следующим образом:

$$dF = IBd\sin\alpha (dl, B) \quad (2.2)$$

Размерность единицы измерения магнитной индукции

$$[B] = \frac{В \cdot с}{м^2} = \frac{Вб}{м^2}.$$

Направление линий индукции магнитного поля, созданного током, протекающим по проводнику, связано с направлением тока правилом штопора: концы рукоятки штопора вращаются в направлении линий магнитной индукции, если штопор вворачивается по направлению тока.

Направление и интенсивность электрического поля измеряются вектором напряженности E .

Направление и интенсивность магнитного поля мы измеряем вектором магнитной индукции B .

Для характеристики энергетических свойств электрического поля была введена другая важная величина — электрический потенциал (разность потенциалов). Аналогичного понятия для магнитного поля ввести нельзя — магнитное поле не относится к числу потенциальных.

Карточка № 2.1 (384)

Магнитное поле. Магнитная индукция

Какое явление подтверждает существование магнитного поля?	Механическое взаимодействие проводников с током, разделенных твердым диэлектриком	1
	Механическое взаимодействие проводников, по которым текут токи	201
	Наблюдаемое в вакууме механическое взаимодействие проводников, по которым текут токи	2
	Механическое взаимодействие проводников с током в газообразном диэлектрике	200

Продолжение карт. № 2.1

Укажите скорость распространения электромагнитного поля в вакууме.	$3 \cdot 10^8$ см/с	3
	$3 \cdot 10^{10}$ см/с	199
	$3 \cdot 10^8$ км/с	4
	$3 \cdot 10^6$ м/с	198
Как запишется закон Ампера, если ось проводника перпендикулярна вектору магнитной индукции?	$F = IlB \sin \angle(l, B)$	5
	$E = IlB \sin \alpha$	197
	$dF = IBdlsin\alpha$	6
	$F = IlB$	196
Укажите: а) общепринятое обозначение магнитной индукции; б) единицу ее измерения.	а) F ; б) В	7
	а) I ; б) В·с	195
	а) l ; б) м	8
	а) B ; б) В·с/м ²	194
$l = 1$ м; $I = 1$ А; $B = 1$ Вб/м ² ; $\alpha = 90^\circ$ (α — угол между векторами l и B). Чему равна сила, действующая на проводник?	Задача не определена	9
	1 Н	193
	1 кг	10
	0	192

2.2. Магнитный поток. Закон Био — Савара

Потоком вектора магнитной индукции равномерного магнитного поля через некоторую плоскость, перпендикулярную к вектору, назовем произведение модуля (абсолютной величины) вектора на площадь, которую он пронизывает.

Поток вектора магнитной индукции принято кратко называть магнитным потоком (обозначается буквой Φ).

В однородном магнитном поле магнитный поток Φ через некоторую площадь S определяется формулой

$$\Phi = BS, \quad (2.3)$$

где B — магнитная индукция, а площадку S перпендикулярна вектору B .

Если поле неоднородно, то вначале следует найти магнитный поток через элементарную площадку dS , а магнитный поток через всю поверхность найти интегрированием:

$$d\Phi = \overline{BdS} = BdS \cos \angle(\overline{B}, d\overline{S});$$

$$\Phi = \int_S \overline{BdS}.$$

Магнитные силовые линии непрерывны, поэтому магнитный поток через любую замкнутую поверхность равен нулю:

$$\oint_S \overline{BdS} = 0.$$

Формула (2.3) позволяет найти единицу измерения магнитного потока:

$$[\Phi] = [B][S] = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} \text{м}^2 = \text{Вб}.$$

Магнитный поток измеряется в веберах или вольт-секундах. Иногда используют более мелкую единицу — максвелл:

$$1 \text{ Мкс} = 10^{-8} \text{ Вб}.$$

Магнитный поток создается движением электрических зарядов — электрическим током. Количественная связь между магнитной индукцией и электрическим током определяется законом Био — Савара который является обобщением опытных наблюдений.

Рассмотрим рис. 2.3. По проводнику течет ток I ; dl — элемент длины проводника; R — расстояние между элементом dl и точкой A ; α — угол между осью элемента dl и направлением на точку A . Элементарная магнитная индукция dB , создаваемая в точке A элементом dl , определяется следующей формулой:

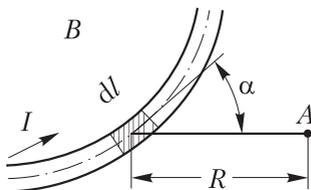


Рис. 2.3

$$dB = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Idl}{R^2} \sin\alpha. \quad (2.4)$$

Если возникает необходимость определить магнитную индукцию в точке A , создаваемую конечным участком проводника, то необходимо просуммировать индукции в точке A , создаваемые малыми отрезками этого конечного участка. Если малые отрезки заменить бесконечно малыми элементами dl , то суммирование сводится к интегрированию выражения (2.4) по всей длине конечного участка проводника.

В формулу (2.4), выражающую закон Био — Савара, входит коэффициент μ . Необходимость введения этого коэффициента объясняется тем, что индукция в точке A зависит не только от силы тока, но, как показывает опыт, и от свойства среды, в которой находится точка A и проводник с током. Под воздействием внешнего магнитного поля отдельные малые области среды ориентируются определенным образом, в результате чего проявляется собственное магнитное поле среды, которое накладывается на внешнее магнитное поле.

Воздействие среды на магнитное поле тока и характеризуется коэффициентом μ .

Кроме того, в выражение (2.4) введен коэффициент 4π , который обеспечивает рационализацию системы единиц измерения.

Карточка № 2.2 (303)

Магнитный поток. Закон Био — Савара

Площадка перпендикулярна силовым линиям однородного магнитного поля. Какой формулой следует воспользоваться, чтобы подсчитать магнитный поток?	$\Phi = \int_S \overline{BdS}$	11
	$\Phi = \int_S B dS$	191
	$d\Phi = B dS$	12
	$\Phi = BS$	190
В каких единицах измеряется магнитный поток?	В	13
	В·с	189
	В·с/м ²	14
	Вб/м ²	188

Продолжение карт. № 2.2

Что определяет закон Био — Савара?	Силу взаимодействия двух проводников с током	15
	Плотность энергии магнитного поля	187
	Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током	16
	Зависимость магнитной индукции от создающего ее тока	186
Изменится ли индукция в точке A (см. рис. 2.3), если изменить положение: а) элемента dI на проводнике; б) точки A в пространстве?	а) Изменится; б) изменится	17
	а) Изменится; б) не изменится	185
	а) Не изменится; б) изменится	18
	а) Не изменится; б) не изменится	184
Ток в проводнике увеличился в 3 раза. Как изменится магнитная индукция (см. рис. 2.3): а) в точке A ; б) в точке B ?	а) Увеличится в 3 раза; б) не изменится	19
	а) Не изменится; б) не изменится	183
	а) Увеличится в 3 раза; б) увеличится в 3 раза	20
	а) Не изменится; б) увеличится в 3 раза	182

2.3. Магнитная проницаемость. Диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные вещества

Мы установили, что коэффициент μ , входящий в выражение закона Био — Савара, определяет воздействие среды на магнитное поле, создаваемое движущимися зарядами (электрическим током).

Коэффициент μ , характеризующий среду, в которой создается магнитное поле, называют абсолютной магнитной проницаемостью вещества.

Абсолютная магнитная проницаемость измеряется в единицах, размерность которых можно найти, используя закон Био — Савара (Гн/м).

Абсолютную магнитную проницаемость пустоты (вакуума) называют магнитной постоянной и обозначают μ_0 :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Безразмерную величину, показывающую, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость вещества больше или меньше магнитной постоянной, называют относительной магнитной проницаемостью или просто магнитной проницаемостью μ_r :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

На практике магнитные свойства вещества чаще всего характеризуют именно магнитной проницаемостью μ_r .

При этом все вещества принято делить на три большие группы.

Вещества, у которых магнитная проницаемость $\mu_r < 1$, называются диамагнитными; к таким веществам относятся, например, вода, стекло, висмут, медь.

Вещества, у которых магнитная проницаемость $\mu_r > 1$, называются парамагнитными (воздух, алюминий, платина, марганец и др.).

Кроме того, выделяют группу ферромагнитных веществ.

Магнитная проницаемость диамагнитных и парамагнитных веществ мало отличается от единицы. Эти отличия в электротехнических расчетах, как правило, не учитываются, поэтому диамагнитные и парамагнитные вещества называют немагнитными, а их магнитную проницаемость μ_r считают равной единице.

Вещества, у которых магнитная проницаемость измеряется тысячами и десятками тысяч единиц ($\mu_r \gg 1$), называются ферромагнитными. В качестве примера ферромагнитных веществ можно назвать кобальт, чугун, никель, железо, сталь, железо-никелевые сплавы (пермаллой). Важная особенность этих веществ состоит в том, что их магнитная проницаемость зависит от магнитной индукции внешнего поля и их предыдущего магнитного состояния.

В настоящее время считают, что ферромагнитные вещества состоят из небольших (10^{-3} мм) намагниченных областей — доменов. При отсутствии внешнего магнитного поля домены расположены хаотически и их магнитные поля вза-

имно компенсируются. В присутствии внешнего магнитного поля домены ориентируются преимущественно вдоль магнитных силовых линий.

Диамагнитные среды несколько уменьшают внешнее магнитное поле (например, поле прямолинейного проводника с током).

Парамагнитные среды несколько увеличивают внешнее магнитное поле.

Ферромагнитные среды увеличивают внешнее магнитное поле в тысячи и десятки тысяч раз.

Карточка № 2.3 (296)

Магнитная проницаемость. Диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные вещества

Что характеризует магнитная проницаемость?	Воздействие среды на величину магнитной индукции, создаваемой током	21
	Зависимость магнитной индукции от создающего ее тока	181
	Магнитные свойства вакуума	120
Что характеризует магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м?	Магнитные свойства вещества	180
	Магнитные свойства воздуха	122
	Магнитные свойства вакуума	189
Ферромагнитными называются вещества, у которых:	$\mu_r < 1$	100
	$\mu_r = \text{const}$	90
	$\mu_r = \text{var}$ (var — символ, обозначающий переменную величину)	101
Укажите строку, в которой названы только парамагнитные вещества.	Вода, медь, стекло	91
	Вода, воздух, алюминий	102
	Воздух, алюминий, марганец	92
	Кобальт, воздух, никель	103
Чему равна магнитная проницаемость в вакууме?	$\mu = 1$	93
	$\mu_0 = 1$	104
	$\mu_r = 1$	94

2.4. Напряженность магнитного поля. Закон полного тока

Напряженность магнитного поля принято обозначать буквой H . Это расчетная величина, определяемая соотношениями:

$$H = \frac{B}{\mu}; \quad B = \mu H. \quad (2.5)$$

Напряженность магнитного поля измеряется в амперах, деленных на метры:

$$[H] = \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Понятие напряженности позволяет в наиболее простой форме записать закон полного тока, широко применяемый при расчете магнитных цепей.

Чтобы упростить математические выкладки, мы рассмотрим закон полного тока применительно к частному и наиболее простому случаю.

В плоскости, перпендикулярной бесконечно длинному прямолинейному проводнику, проведем окружность с центром в точке O и радиусом, равным h . Эта окружность изображена на рис. 2.4. Длину окружности обозначим через l , а элемент длины окружности — через $d\bar{l}$. По проводу протекает ток I .

Вычислим интеграл по всему замкнутому контуру l :

$$\oint_l \overline{H d\bar{l}} = \oint_l H d\bar{l} \cos \angle (\overline{H}, \overline{d\bar{l}}).$$

Из соображений симметрии устанавливаем, что величина H не зависит от положения элемента $d\bar{l}$ на окружности, поэтому H как величину постоянную можно вынести за знак интеграла. Кроме того, всегда $\cos \angle (\overline{H}, \overline{d\bar{l}}) = 1$, так как во всех точках окружности вектор H направлен по касательной к ней. Следовательно, для случая, изображенного на рис. 2.4,

$$\oint_l \overline{H d\bar{l}} = \oint_l H d\bar{l} = H \oint_l d\bar{l} = Hl. \quad (2.6)$$

На основании закона Био — Савара нетрудно показать, что для рассматриваемого случая напряженность магнитного поля в точках, лежащих на окружности, следующим образом выражается через ток I и радиус окружности h :

$$H = \frac{I}{2\pi h} = \frac{I}{l}.$$

Подставив это значение H в равенство (2.6), найдем, что

$$\oint_l \overline{H} d\overline{l} = I. \quad (2.7)$$

Отсюда очевидно, что интеграл $\int_l \overline{H} d\overline{l}$ не зависит от радиуса окружности, следовательно, равенство (2.7) остается справедливым для любой окружности, концентричной с рассмотренной.

Можно показать, что равенство (2.7) остается справедливым для замкнутого контура, а также для случая, когда контур пронизывается несколькими токами (рис. 2.5). Назовем полным током алгебраическую сумму токов, пронизывающих поверхность, ограниченную произвольным замкнутым контуром. Будем обозначать полный ток знаком $\sum I$.

Обобщая формулу (2.7) на случай произвольного контура, охватывающего произвольную систему токов, получим так называемый закон полного тока:

$$\oint_l \overline{H} d\overline{l} = \sum I. \quad (2.8)$$

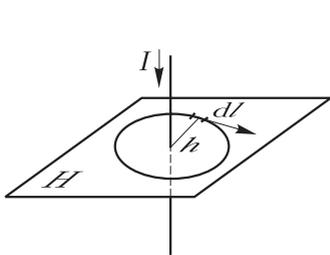


Рис. 2.4

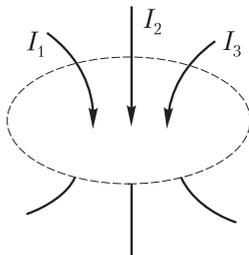


Рис. 2.5

Интеграл по замкнутому контуру вектора напряженности магнитного поля равен полному току через поверхность, ограниченную этим контуром.

Закон полного тока очень широко применяется для расчета магнитных полей. На основе этого закона строятся методы расчета магнитных цепей электрических машин и аппаратов.

Так же, как и закон Био — Савара, закон полного тока устанавливает количественную связь между характеристикой магнитного поля и током, создающим это поле. Однако во многих случаях на практике простую зависимость (2.8) удобнее использовать, чем более сложную (2.4).

Карточка № 2.4 (36)

Напряженность магнитного поля. Закон полного тока

Какое из соотношений позволяет определить напряженность магнитного поля в вакууме?	$H = \frac{B}{\mu}$	105
	$B = \mu H$	95
	$B = 4\pi H \cdot 10^{-7}$	106
Зависят ли: а) вектор напряженности магнитного поля H ; б) модуль вектора H от положения элемента на окружности (см. рис. 2.4)?	а) Зависит; б) зависит	96
	а) Зависит; б) не зависит	107
	а) Не зависит; б) зависит	97
	а) Не зависит; б) не зависит	108
Что называется полным током $\sum I$?	Сумма токов	98
	Сумма токов, пронизывающих поверхность	109
	Сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром	99
	Алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром	110
При прочих равных условиях радиус окружности h увеличился. Как изменится напряженность в точках, лежащих на окружности (см. рис. 2.4)?	Увеличится	100
	Уменьшится	111
	Не изменится	101
	Задача не определена	112
На рис. 2.5: $I_1 = 1$ А; $I_2 = 2$ А; $I_3 = 3$ А. Чему равен полный ток?	0	102
	1 А	113
	2 А	103
	3 А	114

2.5. Магнитное поле тороида

На рис. 2.6 изображена катушка, имеющая форму тороида; ω — число витков катушки; I — ток, протекающий по обмотке. Выберем контур интегрирования в виде окружности с радиусом R_{cp} (на рис. 2.6 обозначен пунктиром). Применим закон полного тока. По соображениям симметрии заключаем, что вектор H во всех точках выбранного контура направлен по касательной и постоянен по величине. Поэтому левая часть выражения (2.8) принимает вид

$$\oint_l \overline{H} dl = \oint_l H dl = H \oint_l dl = Hl = H2\pi R_{\text{cp}}.$$

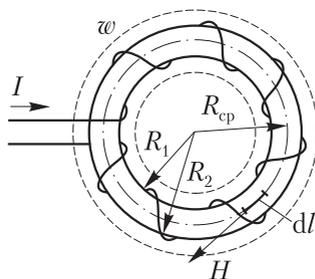


Рис. 2.6

Сумму токов, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром интегрирования, выразим через ток и число витков катушки, тогда правая часть выражения (2.8) будет записана следующим образом:

$$\sum I H = \omega I.$$

В соответствии с законом полного тока

$$H2\pi R_{\text{cp}} = \omega I.$$

Отсюда

$$H = \frac{\omega I}{2\pi R_{\text{cp}}} = \frac{\omega I}{l}, \quad (2.9)$$

где l — длина окружности:

$$l = 2\pi R_{\text{cp}} = 2\pi \frac{R_1 + R_2}{2} = \pi(R_1 + R_2)$$

Зная напряженность магнитного поля и материал тороидального сердечника, нетрудно найти магнитную индукцию внутри катушки

$$B = \mu H = \frac{\mu \omega l}{l}. \quad (2.10)$$

Формулы (2.9) и (2.10) применимы не только к тороидальным катушкам, но с большей степенью точности справедливы и для так называемых «длинных катушек», у которых длина значительно больше диаметра (рис. 2.7).

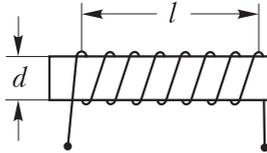


Рис. 2.7

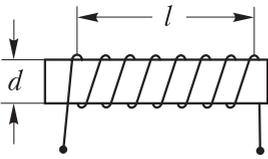
При условии, что $\frac{l}{d} \geq 5$, формулами (2.9), (2.10) можно пользоваться, не прибегая к поправкам.

Карточка № 2.5 (211)

Магнитное поле тороида

Чему равен полный ток (см. рис. 2.6) для контуров-окружностей с радиусами: 1) R_1 ; 2) R_{cp} ; 3) R_2 ?	1) 0; 2) 0; 3) 0	104
	1) ωl ; 2) 0; 3) ωl	115
	1) ωl ; 2) ωl ; 3) ωl	105
	1) 0; 2) ωl ; 3) 0	116

Продолжение карт. № 2.5

Как изменится напряженность магнитного поля в сердечнике, если при прочих равных условиях увеличить длину тороида $l = 2\pi R_{\text{ср}}$?	Уменьшится	107
	Увеличится	95
	Не изменится	108
Как изменится магнитный поток в сердечнике, если при прочих равных условиях увеличить длину тороида l ?	Уменьшится	94
	Увеличится	109
	Не изменится	201
Как изменится магнитная индукция внутри катушки (см. рис. 2.7), если в катушку вставить стальной сердечник ($\mu_r \gg 1$)?	Уменьшится	93
	Увеличится	100
	Не изменится	92
Какая катушка называется длинной? 	Имеющая большую длину l	99
	Имеющая больший диаметр d	193
	Имеющая маленький диаметр	98
	У которой отношение l/d велико	194

2.6. Закон электромагнитной индукции

Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны. Мы уже говорили, что магнитное поле создается движением электрических зарядов. С другой стороны, в 1831 г. Фарадей открыл, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, в этом контуре возникает, или, как говорят, индуцируется (наводится) электродвижущая сила. В проводящем контуре под действием индуцированной ЭДС течет электрический ток.

Это явление, получившее название электромагнитной индукции, имеет чрезвычайно важное значение для понимания работы и конструирования абсолютного большинства электротехнических и радиотехнических устройств.

Количественная зависимость индуцированной ЭДС от характеристик магнитного поля выражается законом электромагнитной индукции: электродвижущая сила вдоль замкнутого контура, не содержащего других источников ЭДС, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур (рис. 2.8):

$$e = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.11)$$

Если контур состоит из w витков и все витки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, то величина индуцированной в контуре ЭДС оказывается в w раз больше ЭДС, индуцируемой в одном витке:

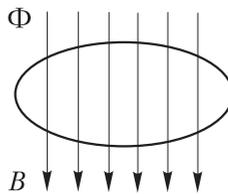


Рис. 2.8

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.12)$$

Если витки катушки пронизываются различными по величине магнитными потоками, то целесообразно ввести новое понятие — потокосцепления. Потокосцеплениями Ψ катушки называют сумму магнитных потоков, пронизывающих каждый виток:

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n.$$

Используя понятие потокосцеплений, можно дать наиболее общую формулировку закона электромагнитной индукции:

$$e = \frac{d\Psi}{dt}. \quad (2.13)$$

Нетрудно убедиться, что формулы (2.12) и (2.11) являются частными случаями формулы (2.13). Если, например, все витки катушки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \dots = \Phi_w$, то $\Psi = w\Phi$ и формула (2.13) может быть записана в виде (2.12). При $w=1$ выражение (2.12) обращается в (2.11).

Знак минус в выражении (2.11), (2.12), (2.13) введен для удобства, исходя из правила знаков для записи уравнений Кирхгофа.

Отметим еще, что формулы (2.11) и (2.13) позволяют легко найти размерность единицы измерения магнитного потока и потокоцеплений:

$$[\Phi] = [\Psi] = [e][t] = \text{В} \cdot \text{с} = \text{Вб (вебер)}.$$

Карточка № 2.6 (179)

Закон электромагнитной индукции

Что нужно для того, чтобы в замкнутом контуре возникла ЭДС?	Контур должен находиться в магнитном поле	15
	Нужно перемещать контур в магнитном поле	301
	Необходимо, чтобы менялся магнитный поток, пронизывающий контур	16
	Необходимо, чтобы стороны контура пересекали магнитные силовые линии	300
Чему пропорциональна индуцированная ЭДС?	Пропорциональна величине магнитного потока, пронизывающего контур	17
	Обратно пропорциональна величине магнитного потока, пронизывающего контур	299
	Обратно пропорциональна числу витков контура	18
	Прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур	298
Число витков контура $w = 10$. Магнитный поток, пронизывающий витки, увеличивался от 0 до 5 В·с равномерно в течение 2 с. Какая ЭДС индуцировалась в контуре?	Постоянная, 25 В	19
	Переменная, с максимальным значением 25 В	197
	Постоянная, 5 В	20
	Переменная, с максимальным значением 5 В	196

Продолжение карт. № 2.6

Число витков контура $w = 10$. Все витки пронизываются одним и тем же магнитным потоком $\Phi = 1$ В·с. Чему равны потоко-сцепления контура?	0	21
	1 Вб	195
	10 Вб	22
	0,1 Вб	194
Скорость изменения потоко-сцеплений контура равна 10 Вб/с. Какая ЭДС индуцируется в контуре?	Задача не определена, так как неизвестен магнитный поток, пронизывающий контур	23
	Задача не определена, так как неизвестно число витков контура	193
	10 В	24
	0	192

2.7. Движение прямолинейного проводника в магнитном поле. Принцип Ленца

Рассмотрим рис. 2.9, где изображен южный полюс магнита и входящие в него линии магнитной индукции. Над полюсом расположен проводник, к концам которого подсоединен вольтметр.

Проводник, вольтметр и соединительные провода образуют замкнутый контур. Длину проводника, который находится в магнитном поле, назовем активной длиной l . Проводник расположен так, что его ось перпендикулярна линиям магнитной индукции B .

Пусть за время dt проводник переместился на расстояние dx в направлении, образующем прямой угол с осью проводника и линиями магнитной индукции.

Из рис. 2.9. очевидно, что при этом магнитный поток, пронизывающий контур, увеличится на величину $d\Phi = B dS$, где dS — заштрихованная площадь, равная $l dx$. Таким образом,

$$d\Phi = B dS = B l dx. \quad (2.14)$$

Обозначим через v — скорость движения проводника. Тогда пройденный путь dx может быть выражен через скорость и время:

$$dx = v dt.$$

Подставим в (2.14) значение dx :

$$d\Phi = Blv dt.$$

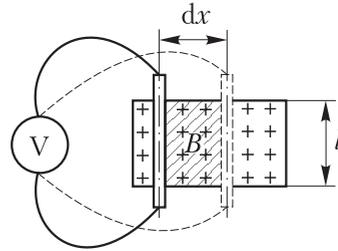


Рис. 2.9

Отсюда находим

$$\frac{d\Phi}{dt} = Blv. \quad (2.15)$$

Сравнивая (2.11) и (2.15), получаем

$$|e| = Blv.$$

Принято прямые линии, обозначающие абсолютное значение (модуль) величины e , опускать и записывать последнее выражение в следующем виде:

$$e = Blv. \quad (2.16)$$

Формула (2.16) является второй формой записи закона электромагнитной индукции.

Иногда формулу (2.13) называют законом электромагнитной индукции в формулировке Максвелла, а формулу (2.16) — законом электромагнитной индукции в формулировке Фарадея. Формулировка Максвелла удобна для случая, когда неподвижный контур пронизывается переменным магнитным потоком. Формулировка Фарадея — когда проводник пересекает линии магнитной индукции (магнитные силовые линии).

Но обе формулировки выражают один и тот же физический закон и поэтому естественно, что одна может быть получена из другой путем формальных логических рассуждений.

Направление ЭДС, индуцированной в соответствии с формулой (2.16), определяется правилом правой руки.

Для определения направления индуцированной ЭДС и тока можно использовать также принцип Ленца, в соответствии с которым индуцированный ток имеет такое направление, что создаваемый им магнитный поток и воз-

никающие механические силы обязательно препятствуют изменению потокоцеплений контура.

Принцип Ленца отражает явление электромагнитной инерции: потокоцепления контура не могут измениться скачком, так же как не может измениться скачком положение тела в пространстве.

Карточка № 2.7 (247)

Движение прямолинейного проводника в магнитном поле.

Принцип Ленца

Каждый крестик на рис. 2.9 изображает одну силовую линию. Сколько силовых линий пронизывает: а) сплошной контур; б) контур, изображенный пунктиром?	а) 4; б) 8	301
	а) 4; б) 12	121
	а) 4; б) 20	300
	а) 8; б) 12	122
Какая ЭДС возникает в контуре, если вольтметр сместится влево, как показано на рис. 2.9?	Задача не определена, так как неизвестна скорость перемещения вольтметра	299
	Задача не определена, так как неизвестна активная длина проводника и магнитная индукция	123
	0	298
	Возникает ЭДС, пропорциональная скорости движения вольтметра	124
На рис. 2.9: $B = 1 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; $l = 1 \text{ м}$; $v = 1 \text{ м}/\text{с}$. Чему равна величина индуктированной ЭДС?	10^8 В	75
	0	125
	10 В	74
	1 В	126
Как определяется направление индуктированной ЭДС и тока?	Правилом правой руки	73
	Правилом левой руки	127
	Правилом буравчика	72

Продолжение карт. № 2.7

Укажите наиболее общую формулировку принципа Ленца.	Индуктированный ток препятствует уменьшению потокосцеплений контура	128
	Индуктированный ток препятствует изменению потокосцеплений контура	71
	Индуктированный ток стремится устранить причину, его вызывающую	129
	Индуктированный ток препятствует движению проводника в магнитном поле	70

2.8. Явление самоиндукции. Индуктивность

Мы уже отмечали, что магнитное поле создается электрическим током, а электрический ток всегда сопровождается магнитным полем. Ток может течь только в замкнутом контуре, а созданное током магнитное поле пронизывает этот замкнутый контур, создавая потокосцепление, которое принято называть потокосцеплением самоиндукции.

Если ток в контуре изменяется, то изменяется созданный током магнитный поток и потокосцепление самоиндукции. При этом в силу закона электромагнитной индукции (2.12) в контуре возникает электродвижущая сила.

Явление возбуждения электродвижущей силы в электрической цепи в результате изменения тока в этой же цепи называют самоиндукцией.

Для количественной характеристики явления самоиндукции вводят коэффициент L , который называют индуктивностью.

Индуктивность характеризует связь потокосцепления самоиндукции с током в рассматриваемой электрической цепи. Индуктивность равна отношению потокосцепления самоиндукции к току, протекающему в этой цепи:

$$L = \frac{\Psi}{I}. \quad (2.17)$$

Для заданной цепи (контура) индуктивность — величина постоянная. Она зависит только от геометрических размеров

контура, его конфигурации и магнитной проницаемости окружающей среды, но не зависит ни от тока в контуре, ни от магнитного потока, пронизывающего контур. Ниже, на примере индуктивности тороида, мы убедимся в этом.

Единицу измерения индуктивности называют генри (Гн). Размерность этой единицы определяется из выражения (2.17).

$$[L] = \frac{[\Psi]}{[I]} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Гн}.$$

На рис. 2.10 приведено условное изображение на схемах катушки индуктивности, обладающей пренебрежимо малым активным сопротивлением (а) и катушки, обладающей как индуктивностью, так и заметным активным сопротивлением (б).

Из (2.17) находим

$$\Psi = LI. \quad (2.18)$$

Подставив (2.18) в (2.13), получим

$$e = -\frac{dLI}{dt}.$$

Поскольку L — величина для данной электрической цепи постоянная, она может быть вынесена за знак дифференциала:

$$e = -L \frac{dI}{dt}. \quad (2.19)$$

Выражение (2.19) представляет интерес только для переменного тока (производная постоянного тока по времени тождественно равна нулю). В электротехнике переменные величины принято обозначать малыми буквами. В соответствии со сказанным выражение (2.19) записывают в виде

$$e = -L \frac{di}{dt}. \quad (2.20)$$

Формула (2.20) играет чрезвычайно важную роль в теории переменных токов.

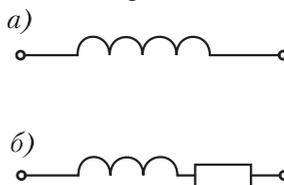


Рис. 2.10

Карточка № 2.8 (282)

Явление самоиндукции. Индуктивность

Расположите в правильной логической последовательности причины и следствия.	Изменился ток в контуре, изменился магнитный поток, изменилось потокоцепление, возникла ЭДС самоиндукции	69
	Изменился магнитный поток, изменилось потокоцепление, возникла ЭДС самоиндукции, изменился ток в контуре	130
	Изменилось потокоцепление, возникла ЭДС самоиндукции, изменился ток в контуре, изменился магнитный поток	68
	Возникла ЭДС самоиндукции, изменился ток в контуре, изменился магнитный поток, изменилось потокоцепление	131
Какое электротехническое понятие принято обозначать буквой L ?	Индукцию	67
	Электромагнитную индукцию	132
	Самоиндукцию	66
	Индуктивность	133
Как ведут себя при изменении тока в контуре: а) Ψ ; б) L ?	а) Меняется; б) меняется	65
	а) Постоянно; б) меняется	201
	а) Меняется; б) постоянна	64
	а) Постоянно; б) постоянна	200
По катушке, имеющей 100 витков, протекает ток 1 А. При помощи флюксметра измерен магнитный поток Φ , пронизывающий катушку. $\Phi = 0,001$ В·с. Чему равна индуктивность катушки?	0,001 Ом·с	63
	0,01 Ом·с	105
	0,1 Ом·с	62
	1 Гн	106

Продолжение карт. № 2.8

Индуктивность катушки $L = 1$ Гн. Ток в обмотке равномерно возрос от 0 до 1 А в течение 0,1 с. Какой величины ЭДС самоиндукции возникла в обмотке?	0,1 В	55
	1 В	78
	10 В	54
	100 В	79

2.9. Индуктивность тороида

На рис. 2.11 изображен тороидальный сердечник, длина которого l , площадь поперечного сечения S . Магнитная проницаемость сердечника μ . На сердечнике намотана обмотка, имеющая число витков w .

Умножим левую и правую части уравнения (2.10) на S , а потом умножим левую и правую части полученного уравнения на w :

$$\Phi = BS = \frac{\mu w I S}{l};$$

$$\Psi = w\Phi = \frac{\mu w^2 I S}{l}.$$

Из последнего уравнения находим

$$\frac{\Psi}{I} = \frac{\mu w^2 S}{l}. \quad (2.21)$$

Сравнивая (2.21) с (2.17), получаем:

$$L = \frac{\mu w^2 S}{l}. \quad (2.22)$$

Формула (2.22) практически справедлива и для катушки, изображенной на рис. 2.7, при условии, что $l/d \geq 5$.

Индуктивность тороида зависит от магнитной проницаемости сердечника μ . Изменяя μ , можно в широких пределах менять индуктивность тороида. На этом свойс-

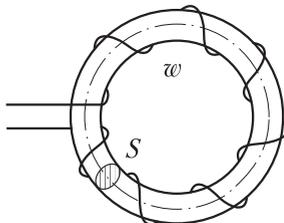


Рис. 2.11

тве индуктивности основан принцип работы магнитных усилителей.

Индуктивность тороида не зависит от потокоцеплений обмотки и тока (при условии, что сердечник не насыщается и магнитная проницаемость μ при всех режимах работы остается постоянной).

Выведенные формулы с большой степенью точности применимы не только в случае тороидального сердечника, но и замкнутых сердечников другой формы. В частности, эти формулы практически полностью применимы к трансформаторам и магнитным усилителям с прямоугольным сердечником, которые широко используются в технике.

Погрешности возникают за счет потоков рассеяния. Поскольку у замкнутых сердечников потоки рассеяния невелики, то и погрешности оказываются небольшими и ими можно пренебречь.

Карточка № 2.9 (161)
Индуктивность тороида

Вспомните формулу, определяющую величину магнитной индукции в сердечнике тороида.	$B = \mu H$	1
	$dB = \frac{\mu}{4\pi} \frac{Idl}{R^2} \sin\alpha$	101
	$B = \frac{\Phi}{S}$	2
	$B = \frac{\mu \tau \omega I}{l}$	111
Число витков катушки увеличилось в 2 раза. Как изменилась индуктивность катушки?	Увеличилась в 2 раза	3
	Увеличилась в 4 раза	121
	Не изменилась	4
	Уменьшилась в 4 раза	131

Продолжение карт. № 2.9

Внутрь катушки, намотанной на алюминиевый каркас, введен стальной сердечник. Как изменилась индуктивность катушки?	Не изменилась	5
	Увеличилась	141
	Уменьшилась	6
	Задача не определена	151
Дана катушка с воздушным сердечником. Ее потокосцепления увеличились в 2 раза. Как изменилась индуктивность катушки?	Не изменилась	7
	Увеличилась	161
	Уменьшилась	8
	Увеличилась в 2 раза	171
Найдите индуктивность катушки с воздушным сердечником, если $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $w = 1000$ витков; $S = 10$ см ² ; $l = 4\pi$ см.	0,1 Гн	9
	0,01 Гн	181
	0,001 Гн	10
	0,0001 Гн	191

2.10. Явление взаимной индукции

Если два контура расположены поблизости один от другого, то даже в том случае, когда они электрически не связаны, они воздействуют друг на друга через магнитное поле.

Назовем потокосцеплением взаимной индукции потокосцепление одной электрической цепи, обусловленное электрическим током в другой электрической цепи.

Если ток в соседней электрической цепи меняется, то меняется потокосцепление рассматриваемой электрической цепи. При этом в рассматриваемой цепи возникает так называемая ЭДС взаимной индукции.

Явление возбуждения электродвижущей силы в электрической цепи при изменении потокосцепления взаимной индукции этой цепи называют явлением взаимной индукции.

На рис. 2.12 изображены две катушки с числом витков w_1 и w_2 , питаемые токами I_1 и I_2 . Обозначим:

Φ_1 — магнитный поток, созданный током I_1 и сцепленный с витками только первой катушки;

Φ_2 — магнитный поток, созданный током I_2 , сцепленный с витками только второй катушки;

Φ_{12} — магнитный поток, созданный током первой катушки и сцепленный с витками как первой, так и второй катушек;

Φ_{21} — магнитный поток, созданный током второй катушки, сцепленный с витками второй и первой катушек.

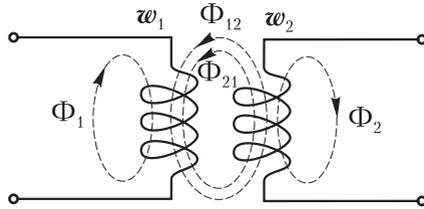


Рис. 2.12

В соответствии с данными выше определениями запишем:

$$\Psi_1 = \omega_1 \Phi_{21},$$

$$\Psi_2 = \omega_2 \Phi_{12}.$$

Здесь через Ψ_1 обозначено потокосцепление взаимной индукции первой катушки, а через Ψ_2 — потокосцепление взаимной индукции второй катушки.

Явление взаимной индукции количественно характеризуют взаимной индуктивностью M . Понятие M определяется следующими равенствами:

$$M = \frac{\Psi_1}{I_2}; \quad M = \frac{\Psi_2}{I_1}.$$

Размерность единицы измерения взаимной индуктивности M совпадает с размерностью единицы измерения индуктивности L . Таким образом, взаимная индуктивность измеряется в генри (Гн).

В отличие от индуктивности L , которая является существенно положительной величиной, взаимная индуктивность может быть как положительной, так и отрицательной. M считается положительной, если магнитный поток взаимной индукции складывается с собственным магнитным потоком катушки. M считается отрицательной, если поток взаимной индукции и собственный магнитный поток катушки направлены встречно.

ЭДС взаимной индукции выражаются формулами, аналогичными формуле (2.20):

$$e_1 = -M \frac{di_2}{dt},$$

$$e_2 = -M \frac{di_1}{dt}.$$

Электродвижущая сила e_1 индуцируется в первом контуре при изменении тока во втором контуре; e_2 индуцируется во втором контуре при изменении тока в первом.

Контур (цепи), в которых заметно выражено явление взаимной индукции, называются магнитосвязанными. Степень магнитной связи характеризуют двумя коэффициентами: коэффициентом связи K и коэффициентом рассеяния σ . Эти коэффициенты легко подсчитываются, если известны индуктивности каждого из контуров L_1 и L_2 и взаимная индуктивность M .

Карточка № 2.10 (100)
Явление взаимной индукции

Могут ли в одном и том же контуре одновременно возникать ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции?	Да	11
	Нет	102
Расположите в правильной логической последовательности причины и следствия.	Изменился ток в контуре, изменился магнитный поток, изменились потокоцепления соседнего контура, возникла ЭДС взаимной индукции	12
	Изменились потокоцепления соседнего контура, изменился магнитный поток, возникла ЭДС самоиндукции	112
	Изменился магнитный поток, изменился ток в контуре, возникла ЭДС самоиндукции	13
	Возникла ЭДС взаимной индукции, изменился ток в соседнем контуре, изменились потокоцепления, изменился магнитный поток	122

Продолжение карт. № 2.10

Какое электротехническое понятие принято обозначать буквой M ?	Индукцию	14
	Электромагнитную индукцию	132
	Взаимную индукцию	15
	Взаимную индуктивность	142
Ток в соседнем контуре равномерно увеличивался от 0 до 1 А. При этом в данном контуре возникла ЭДС взаимной индукции величиной 1 В. Чему равна взаимная индуктивность?	Задача не определена, так как неизвестна скорость изменения тока	16
	Задача не определена, так как неизвестно расстояние между контурами	152
	0	17
	1 Гн	162
Потокосцепление взаимной индукции первой катушки равно 0,1 В·с при токе во второй катушке, равном 0,1 А. Чему равна взаимная индуктивность?	0,01 Гн	18
	0,1 Ом·с	172
	1 Ом·с	19
	100 Гн	182

2.11. Ферромагнетизм

При рассмотрении магнитных свойств веществ мы выделили обширный класс материалов, обладающих способностью резко увеличивать магнитное поле, в котором они находятся. Такие материалы получили название ферромагнитных, так как их специфические свойства впервые были обнаружены у железа.

Ферромагнитные материалы играют важную роль в современной технике. Для изготовления электрических генераторов, двигателей, трансформаторов ежегодно расходуются миллионы тонн электротехнических сталей. Без ферромагнитных материалов немыслима современная радиотехника. Ферромагнитные материалы широко применяются в быстродействующих вычислительных машинах, в технике звукозаписи, в технике усиления слабых сигналов. Мощные многотонные магниты лежат в основе устройства ускорителей элементарных частиц — главного орудия исследования микромира.

Свойства ферромагнитных материалов связаны с самопроизвольным намагничиванием малых областей — доменов и ориентацией этих областей во внешнем магнитном поле. В ферромагнитных материалах зависимость между индукцией и напряженностью магнитного поля не подчиняется линейному закону, а имеет сложную форму, которую трудно выразить аналитически. Эта зависимость впервые была исследована известным русским ученым А. Г. Столетовым и изображена им в виде графика, получившего название петли магнитного гистерезиса (рис. 2.13). Из рис. 2.13 очевидно, что одному и тому же значению напряженности магнитного поля соответствуют различные значения магнитной индукции в зависимости от того, намагничивается или размагничивается материал.

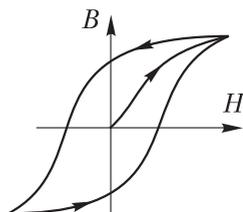


Рис. 2.13

В неоднозначности функции $B = f(H)$ и проявляется магнитный гистерезис, под которым понимают явление зависимости магнитной индукции в ферромагнитном веществе при данной напряженности магнитного поля, от предшествующих магнитных состояний вещества.

При намагничивании ферромагнитного материала домены ориентируются (поворачиваются) вдоль силовых линий внешнего поля. При изменении направления силовых линий внешнего поля (при перемагничивании вещества) изменяется и ориентация доменов. Очевидно, что на поворот доменов затрачивается энергия. Эту энергию называют потерями на гистерезис. Нетрудно понять, что потери на гистерезис тем больше, чем больше частота перемагничивания и чем больше вес перемагничиваемого образца. Более детальное исследование показывает, что потери на гистерезис пропорциональны также площади петли гистерезиса.

С целью уменьшения потерь на гистерезис в электрических машинах и трансформаторах применяют материалы с очень узкой петлей гистерезиса, так что на графике обе ветви петли почти сливаются. В таких случаях материал характеризуют некоторой усредненной кривой намагничивания (рис. 2.14).

Магнитные материалы, имеющие узкую петлю гистерезиса, принято называть магнитомягкими.

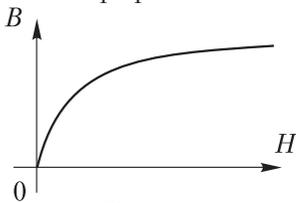


Рис. 2.14

Магнитотвердые материалы с широкой петлей гистерезиса также находят применение. Они используются для изготовления постоянных магнитов, лент для магнитной звукозаписи, в вычислительной технике и т.д.

Во многих случаях важное значение имеет форма петли гистерезиса. Широкое применение находят материалы с прямоугольной формой петли.

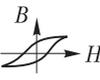
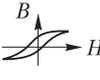
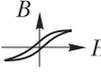
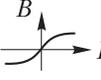
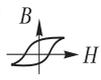
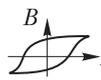
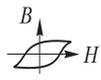
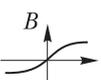
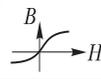
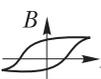
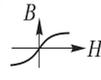
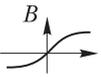
К магнитомягким материалам относятся: электротехническая сталь, электролитическое железо, пермаллой, чугун. Из магнитотвердых материалов наибольшее распространение получили кобальтовые стали, платино-железные и платино-кобальтовые сплавы, а также сплавы типа альни, альнико, магнико.

Карточка № 2.11 (247)

Ферромагнетизм

Во всех ли перечисленных ниже областях техники используются ферромагнитные материалы: электротехника; радиотехника; электронно-вычислительная техника; техника звукозаписи; экспериментальная ядерная физика?	Нет	20
	Во всех	192
	Во всех, за исключением одной	21
	Во всех, за исключением двух	103
Почему зависимость $B = f(H)$ не принято выражать аналитически, в виде формулы, а задают либо в виде графика, либо в виде таблиц?	Аналитическое выражение невозможно	21
	Аналитическое выражение громоздко	113
	При расчетах график всегда удобней, чем формула	22
	При расчетах таблица всегда удобней, чем формула	123

Продолжение карт. № 2.11

Приведены зависимости $B = f(H)$ для ряда материалов (масштаб графиков одинаков). В каком случае потери на гистерезис наименьшие?		23
		133
		24
		143
Что такое потери на гистерезис?	Энергия остаточного магнитного поля	25
	Энергия, необходимая для создания магнитного поля в материале	153
	Энергия, затрачиваемая на изменение ориентации доменов	26
	Энергия электромагнитного поля	193
Характеристика материала задана его петлей гистерезиса. Какие материалы целесообразно применять: а) для магнитопроводов; б) для изготовления постоянных магнитов?	а)  б) 	163
	а)  б) 	27
	а)  б) 	173
	а)  б) 	28

2.12. Магнитная цепь. Ферромагнитные материалы

Магнитной цепью называют сочетание деталей и воздушных зазоров, через которые замыкается магнитный поток.

Отдельные участки магнитной цепи могут быть выполнены из различных материалов и иметь различную длину и сечение. Размеры и материал отдельных участков магнитной цепи обычно определяются конструктивными соображениями. При этих условиях задача расчета магнитной цепи сводится к вычислению параметров обмотки по заданной величине магнитного потока или, наоборот, к определению величины магнитного потока по заданным параметрам обмотки при выбранных размерах, конфигурации и материале цепи.

Расчет неразветвленных магнитных цепей производится на основании закона полного тока. При расчете разветвленных магнитных цепей помимо закона полного тока используют следующее утверждение: в месте разветвления магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных потоков равна нулю.

Это утверждение является непосредственным следствием закона непрерывности линий магнитной индукции. Так, для магнитной цепи, изображенной на рис. 2.15, справедливо равенство

$$\Phi - \Phi_1 - \Phi_2 = 0.$$

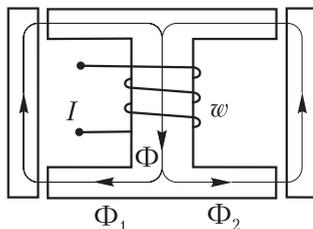


Рис. 2.15

Магнитные цепи в основном изготавливаются из магнитомягких материалов.

Для характеристики магнитомягких материалов, которые используются в качестве магнитопроводов в магнитных цепях электромагнитов, трансформаторов, электрических машин и др., наибольшее значение имеет магнитная проницаемость μ_r и магнитная индукция насыщения B_{\max} . Чем больше магнитная проницаемость, тем меньшее сопротивление прохождению магнитного потока оказывает материал, тем лучше его магнитопроводящие свойства. Магнитная индукция насыщения B_{\max} показывает, при каких индукциях материал еще сохраняет хорошие проводящие (по отношению к магнитному потоку) свойства. При дости-

жении индукцией значений, превышающих B_{\max} , магнитная проницаемость материала резко уменьшается.

Что касается коэрцитивной силы H_k , то у магнито-мягких материалов она незначительна, имеет значение от единиц до нескольких десятков А/м. Только у чугуна, который ввиду его сравнительно низкой стоимости часто используется для изготовления магнитопроводов, коэрцитивная сила достигает 1000 А/м.

В табл. 2.1 приводятся основные характеристики некоторых магнитомягких материалов.

Таблица 2.1

Материал	Магнитная проницаемость	Магнитная индукция насыщения
Электролитическое железо	15 000	—
Карбонильное железо	20 000	2,0
Армко-железо	5000	2,0
Пермаллой (78,5% никеля, 21,5% железа)	100 000	1,1
Альсифер (84,9% железа, 9,5% кремния, 5,6% алюминия)	110 000	1,4
Чугун	180	1,3

Основные характеристики магнитотвердых материалов — коэрцитивная сила H_k и остаточная индукция $B_{\text{ост}}$ — приведены в табл. 2.2. Чем больше коэрцитивная сила и остаточная индукция материала, из которого изготовлен постоянный магнит, тем более сильное магнитное поле способен создавать этот магнит в воздушном зазоре.

В последнее время получены материалы, которые обладают большой магнитной проницаемостью и одновременно малыми потерями на нагрев при высоких частотах. Эти материалы образуются соединением оксидов трехвалентного железа с двухвалентным металлом, например цинком или никелем. Они называются ферритами. Ферриты удовлетворительно работают при частотах переменного тока, достигающих миллионов герц.

Таблица 2.2

Материал	Коэрцитивная сила H_k , А/м	Остаточная индукция B_r , Вб/м ²
Вольфрамовая сталь	4800	1,0
Хромовая сталь	4800	0,9
Кобальтовая сталь	10 400	0,9
Альниси	64 000	0,4
Альнико	40 000	0,7
Магнико	44 000	1,2
Платино-железный сплав	100 000	0,5
Платино-кобальтовый сплав	200 000	0,4

В технике звуковых частот (до 20 000 Гц) большое распространение получили детали, изготовленные из порошков магнитомягких материалов. Например, порошкообразное железо смешивается с лаком и прессуется в виде сердечников различной формы. Применение таких сердечников в звуковых трансформаторах резко снижает потери на нагрев по сравнению с потерями в трансформаторах со сплошным сердечником.

Карточка № 2.12 (155)

Магнитная цепь. Ферромагнитные материалы

Известно, что никакая часть электропровода не может быть выполнена из изоляционного материала. Может ли магнитопровод содержать немагнитные (медные, алюминиевые, картонные и др.) прокладки?	Да	29
	Нет	183
Какому известному закону аналогично утверждение, что магнитный поток, притекающий к участку разветвления, равен сумме магнитных потоков, утекающих от этого участка?	Закону Ома для участка цепи	30
	Закону Ома для замкнутой цепи	193
	Первому закону Кирхгофа	31
	Второму закону Кирхгофа	203

Продолжение карт. № 2.12

Положите для рис. 2.15: $\Phi_1 = 1$ В·с; $\Phi = 1,5$ В·с. Чему равен Φ_2 ?	Задача не определена, так как неизвестен ток в обмотке	132
	Задача не определена, так как неизвестно число витков	213
	$\Phi_2 = 2,5$ В·с	33
	$\Phi_2 = 0,5$ В·с	223
Расположите материалы в порядке возрастания их коэрцитивной силы.	Альнико, хромовая сталь, магнико	34
	Кобальтовая сталь, платино-кобальтовый сплав, альниси	233
	Вольфрамовая сталь, альнико, платино-кобальтовый сплав	35
	Платино-железный сплав, магнико, кобальтовая сталь	243
Какие материалы можно использовать при частотах переменного тока порядка 10^6 Гц?	Пермаллой	36
	Легированные стали	253
	Ферриты	37

ГЛАВА 3

ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

3.1. Переменный ток

В отличие от постоянного тока любой изменяющийся ток можно назвать переменным. Однако на практике переменным током принято называть ток, изменяющийся с течением времени по синусоидальному закону.

Основная часть электрической энергии, потребляемой в народном хозяйстве, вырабатывается, передается и используется в виде энергии переменного тока. Это объясняется двумя причинами.

1. Величина переменного тока и величина напряжения, действующего в цепи переменного тока, могут быть легко изменены при помощи экономичного простого и надежного устройства, называемого трансформатором.

2. Генераторы и двигатели переменного тока значительно проще и надежней в эксплуатации, чем генераторы и двигатели постоянного тока.

Эти достоинства переменного тока позволяют строить экономичные и надежные линии передачи энергии тепловых и гидроэлектростанций на дальние расстояния. Энергия на электростанциях вырабатывается генераторами, рассчитанными на напряжение 10–20 кВ. Дальнейшее повышение расчетного напряжения генераторов связано с резким увеличением толщины и веса изоляционных деталей, уменьшением надежности машины и возрастанием опасности для обслуживающего персонала. Передавать же энергию при таком сравнительно низком напряжении на дальние расстояния нецелесообразно, так как это связано с большими тепловыми потерями в линии. Чтобы при заданной мощности линии электропередачи снизить тепло-

вые потери, пропорциональные квадрату тока, необходимо уменьшить величину тока и соответственно увеличить напряжение в линии. Эта задача решается при помощи повышающих трансформаторов.

Потребление электрической энергии при высоких и сверхвысоких напряжениях связано с неприемлемым усложнением приемников электрической энергии и опасностью для обслуживающего персонала. Поэтому на приемном конце линии напряжение должно быть понижено до приемлемой с точки зрения техники безопасности величины. Эта задача решается при помощи понижающих трансформаторов.

Структурная схема мощной наземной электрической линии изображена на рис. 3.1. В такой цепи обеспечивается уменьшение потерь на тепло примерно в миллион раз по сравнению с цепью, в которой электроэнергия вырабатывалась бы и передавалась при напряжении потребителя (127–220 В).



Рис. 3.1

Карточка № 3.1 (192)

Переменный ток

Укажите одно из основных достоинств цепей переменного тока по сравнению с цепями постоянного тока.	Возможность передачи энергии на дальние расстояния	263
	Возможность изменения величины напряжения и тока с помощью трансформатора	38
	Возможность преобразования энергии переменного тока в другие виды энергии	273

Продолжение карт. № 3.1

При каком напряжении целесообразно: а) передавать электрическую энергию; б) потреблять электрическую энергию?	а) При высоком; б) при высоком	39
	а) При высоком; б) при низком	283
	а) При низком; б) при низком	40
	а) При низком; б) при высоком	293
Мощность P передается: а) при напряжении 1000 В; б) при напряжении 10 000 В. Во сколько раз тепловые потери в линии в случае б) меньше, чем в случае а)?	В 10 раз	41
	В 100 раз	303
	В 1000 раз	42
	В 10000 раз	313
Зачем устанавливаются понижающие трансформаторы?	Для уменьшения тепловых потерь	43
	Для повышения безопасности обслуживающего персонала	323
Ток в линии электропередачи увеличился в 2 раза. Как изменились тепловые потери в линии?	Не изменились	44
	Увеличились в 2 раза	333
	Увеличились в 4 раза	45
	Уменьшились	343

3.2. Основные характеристики переменного тока

Мы уже говорили, что переменным называется ток, являющийся синусоидальной функцией времени:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

В этой записи приняты следующие обозначения: i — мгновенное значение тока, т.е. значение тока в каждый данный момент времени; I_m — максимальное (амплитудное) значение тока, т.е. значение тока при условии, что $\sin(\omega t + \psi) = 1$, а $\omega t + \psi = \frac{\pi}{2}$; ω — угловая частота переменного тока; t — время, прошедшее с момента начала отсчета; ψ — начальная фаза переменного тока.

Сила переменного тока непрерывно изменяется с течением времени. Каждому моменту времени соответствует свое определенное значение силы тока — мгновенное значение.

Наибольшее из мгновенных значений называется амплитудой.

Синусоидальная функция времени является периодической функцией. Ее значения регулярно повторяются через равные промежутки времени. Наименьший промежуток времени, через который мгновенные значения переменного тока начинают повторяться, называется периодом. Период обозначают буквой T , при этом,

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) = I_m \sin[\omega(t+T) + \psi] = I_m \sin[\omega(t+2T) + \psi] \dots \text{ и т.д.}$$

Величина, обратная периоду, называется частотой f переменного тока:

$$f = \frac{1}{T}.$$

Угловая частота ω определяется выражением

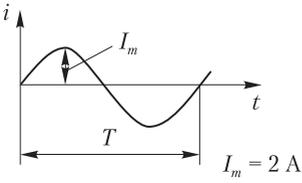
$$\omega = 2\pi f.$$

Аргумент синуса $(\omega t + \psi)$ называют фазой переменного тока. Значение фазы при $t = 0$ называют начальной фазой ψ .

Каждому определенному значению времени соответствует определенная фаза и определенное значение тока. Например, времени t_1 соответствует фаза $(\omega t_1 + \psi)$ и ток $i_1 = I_m \sin(\omega t_1 + \psi)$; времени t_2 — фаза $(\omega t_2 + \psi)$ и ток $i_2 = I_m \sin(\omega t_2 + \psi)$ и т.д.

Карточка № 3.2 (223)

Основные характеристики переменного тока

 <p>Чему равно мгновенное значение тока при:</p> <p>а) $t = \frac{T}{2}$;</p> <p>б) $t = \frac{T}{4}$?</p>	а) 1 А; б) 2 А	46
	а) 0; б) 2 А	363
	а) 2 А; б) 0	47
	а) 2 А; б) 1 А	373
<p>Частота переменного тока равна 50 Гц. Чему равен период?</p>	0,2	48
	0,02	383
	0,02 с	49
	0,2 с	393
<p>Период тока равен 0,02 с. Чему равны: а) угловая частота; б) частота?</p>	а) 314 с^{-1} ; б) 100 Гц	50
	а) 50 Гц; б) 314 с^{-1}	204
	а) 100 Гц; б) $3,14 \text{ с}^{-1}$	51
	а) 314 с^{-1} ; б) 50 Гц	214
<p>Синусоидальный ток задан формулой $i = 0,5 \sin \omega t$. Чему равна амплитуда тока?</p>	1 А	52
	0	224
	0,5 А	53

Продолжение карт. № 3.2

Синусоидальный ток задан формулой $i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ Чему равны: а) фаза тока; б) начальная фаза?	а) $\omega t - \frac{\pi}{2}$; б) $\frac{\pi}{2}$	234
	а) $\omega t + \frac{\pi}{2}$; б) $\frac{\pi}{2}$	54
	а) $\omega t - \frac{\pi}{2}$; б) $-\frac{\pi}{2}$	10
	а) ωt ; б) $-\frac{\pi}{2}$	55

3.3. ЭДС и напряжение в цепи переменного тока

В цепи переменного тока действуют переменные ЭДС и напряжения:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e);$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

В этих формулах обозначены: e , u — мгновенные значения электродвижущей силы и напряжения; E_m , U_m — максимальные (амплитудные) значения ЭДС и напряжения; ω — угловая частота ЭДС и напряжения, равная частоте тока; $\omega t + \psi_e$ — фаза ЭДС; $\omega t + \psi_u$ — фаза напряжения; ψ_e — начальная фаза ЭДС; ψ_u — начальная фаза напряжения.

Напомним, что угловая частота ω и частота f связаны соотношениями

$$\omega = 2\pi f; f = \frac{\omega}{2\pi}.$$

В электрической цепи частота тока и напряжения равна частоте ЭДС период тока и напряжения равен периоду ЭДС.

Период измеряется в секундах. Размерность единицы измерения частоты определяется из выражения

$$[f] = \frac{1}{[T]} = \frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1} = \text{Гц}.$$

Единицу измерения частоты называют герцем (Гц). Фаза и начальная фаза измеряются либо в угловой, либо в радианной мере.

Начальные фазы токов, напряжений и ЭДС в электрической цепи могут различаться в пределах от 0 до $\pm 180^\circ$.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин называется сдвигом по фазе. Разность фаз равна разности начальных фаз и не изменяется с течением времени. Действительно,

$$(\omega t + \psi_1) - (\omega t + \psi_2) = \psi_1 - \psi_2 = \text{const}.$$

Карточка № 3.3 (264)

ЭДС и напряжение в цепи переменного тока

$e = 100 \sin \omega t$. Укажите: а) амплитуду; б) начальную фазу ЭДС.	а) 100 В; б) ωt	254
	а) 100 В; б) 0	56
	а) 100; б) 90°	264
	а) 0; б) 0	57
$u = U \cos \omega t$. Определите начальную фазу напряжения.	0	274
	90°	58
	-90°	284
	180°	59

Продолжение карт. № 3.3

$e = 100 \sin 314t$. Определите частоту ЭДС.	314.	294
	314 с^{-1}	60
	50	304
	50 Гц	61
$e_1 = E_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$; $e_2 = E_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$. Чему равен сдвиг по фазе?	-90°	62
	0	314
	90°	63
	180°	324
$u_1 = U_m \cos \omega t$; $u_2 = U_m \sin \omega t$. Чему равен сдвиг по фазе?	-90°	64
	0	334
	90°	65
	180°	344

3.4. Получение переменной электродвижущей силы

Для питания электрической цепи переменным током необходимо получить переменную ЭДС.

В соответствии с законом электромагнитной индукции в замкнутом контуре возникает электродвижущая сила, если изменяется магнитный поток, пронизывающий этот контур (иначе говорят: сцепленный с контуром).

Величина индуцированной ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения потокосцеплений контура

$$e = \frac{d\Psi}{dt}.$$

Здесь Ψ — сумма магнитных потоков, пронизывающих отдельные витки контура (катушки). Если все витки катушки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, то последняя формула принимает вид

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}.$$

Таким образом, для получения синусоидальной ЭДС достаточно обеспечить такое изменение пронизывающего контур магнитного потока, при котором скорость его изменения подчиняется синусоидальному закону.

Представим себе рамку из w витков, помещенную в однородное магнитное поле. Такая рамка со сторонами a и b изображена в двух проекциях на рис. 3.2. Концы провода, из которого намотана рамка, подсоединены к двум кольцам κ и через щетки ψ , образующие с кольцами скользящий контакт, выведены к неподвижным зажимам.

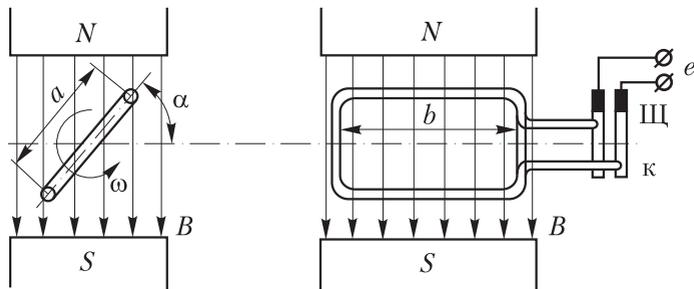


Рис. 3.2

Проекция a' стороны a на плоскость, перпендикулярную магнитным силовым линиям, равна

$$a' = a \cos \alpha.$$

Соответственно площадь S' проекции рамки на ту же плоскость определяется выражением

$$S' = b \cdot a' = ab \cos \alpha.$$

Магнитный поток, пронизывающий рамку, равен произведению

$$\Phi = BS' = Bab \cos \alpha, \quad \Phi = BS \cos \alpha,$$

где $S = ab$ — площадь рамки.

Из начального горизонтального положения будем равномерно вращать рамку против часовой стрелки с угловой скоростью ω , тогда угол α будет равномерно увеличиваться:

$$\alpha = \omega t.$$

При этом

$$\Phi = BS \cos \omega t,$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -BS\omega \sin \omega t.$$

Подставляя найденное значение скорости изменения магнитного потока в формулу закона электромагнитной индукции, получаем

$$e = \omega BS \omega \sin \omega t.$$

Магнитная индукция B , число витков ω , площадь S и угловая скорость вращения рамки ω — величины постоянные. Обозначив их произведение через E_m , получим

$$e = E_m \sin \omega t.$$

$$E_m = \omega BS \omega.$$

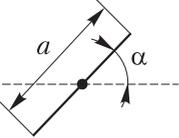
Учитывая, что $S = ab = \frac{a}{2}2b$ и $\frac{a}{2}\omega = v$, можно написать

$$E_m = 2b\omega v,$$

где v — линейная скорость стороны b рамки.

Карточка № 3.4 (365)

Получение переменной электродвижущей силы

Рамка из ω витков пронизывается магнитным потоком $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$. Определите ЭДС, индуктируемую в рамке.	$e = \omega\Phi_m \omega \cos \omega t$	66
	$e = \omega\Phi_m \omega \sin \omega t$	354
	$e = \omega\Phi_m \omega$	67
 Определите проекцию стороны a рамки на горизонтальную плоскость.	$\frac{a}{2} \cos \alpha$	364
	$a \sin \alpha$	68
	$a \cos \alpha$	374

Продолжение карт. № 3.4

Площадь S' проекции рамки на плоскость, перпендикулярную силовым линиям поля, изменяется по закону $S' = S \cos \omega t$. Как изменяется магнитный поток, пронизывающий рамку?	$\Phi = BS \cos \omega t$	69
	$\Phi = S \cos \omega t$	384
	$\Phi = BS$	70
В ответе на предыдущий вопрос положите $BS = \Phi_m$ и напишите выражение для индуцируемой ЭДС, если число витков равно w .	$e = w \Phi_m \omega \cos \omega t$	71
	$e = w \Phi_m \omega \sin \omega t$	394
	$e = w \Phi_m \omega$	72
Индукция магнитного поля в 2 раза увеличилась, а скорость вращения рамки в 2 раза уменьшилась. Как изменилась амплитуда ЭДС, наводимой в рамке?	Увеличилась в 2 раза	201
	Увеличилась в 4 раза	73
	Уменьшилась	211
	Не изменилась	74

3.5. Принцип действия генератора переменного тока

Технически трудно создать достаточно сильное равномерное магнитное поле в большом объеме, поэтому принцип получения синусоидальной ЭДС в генераторах переменного тока несколько отличается от рассмотренного выше.

Магнитная система генератора конструируется так, что стороны рамки, в которых индуцируется ЭДС, пересекают магнитные силовые линии всегда под прямым углом (рис. 3.3.). Для определения величины ЭДС можно использовать формулу Фарадея для закона электромагнитной индукции (обозначения те же, что в предыдущем параграфе):

$$e = B \cdot 2b \cdot w \cdot v.$$

Выразив линейную скорость стороны рамки через угловую скорость ее вращения, получим

$$e = wB \cdot 2b \frac{a}{2} \omega = wBS\omega.$$

Если индукция B в воздушном зазоре машины постоянна, в рамке будет индуцироваться постоянная по величине ЭДС, через каждую половину оборота меняющая свое направление.

Для того чтобы получить синусоидальную ЭДС, необходимо, чтобы индукция в воздушном зазоре машины менялась по синусоидальному закону как функция угла α :

$$B = B_m \sin \alpha = B_m \sin \omega t.$$

Это достигается за счет переменной величины воздушного зазора. Там, где воздушный зазор минимален, индукция имеет максимальное значение. По мере удаления от этого положения величина воздушного зазора увеличивается по синусоидальному закону. Таким образом получают синусоидальное распределение индукции, как это показано на рис. 3.4.

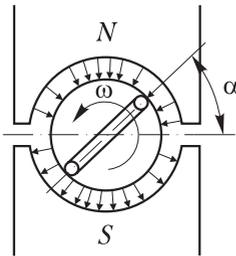


Рис. 3.3

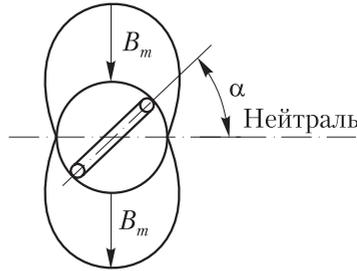


Рис. 3.4

В этом случае

$$e = \omega B_m S \sin \omega t.$$

Полагая

$$\omega B_m S \omega = E_m ,$$

получим

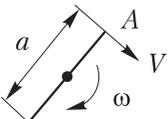
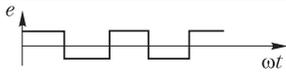
$$e = E_m \sin \omega t;$$

$$e = E_m \sin \alpha.$$

При рассмотрении принципа действия генератора переменного тока мы полагали, что в неподвижном магнитном поле вращается рамка. В реальных машинах рамка заменена обмоткой, которая обычно укладывается в пазы статора и неподвижна в пространстве, а магнитное поле создается вращающимся ротором, представляющим собой электромагнит или постоянный магнит.

Карточка № 3.5 (363)

Принцип действия генератора переменного тока

Укажите формулировку Фарадея для закона электромагнитной индукции.	$e = Blv$	75
	$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}$	221
	$e = -\frac{d\Psi}{dt}$	76
 <p>Отрезок вращается вокруг своего центра с угловой скоростью ω. Найдите линейную скорость точки A.</p>	$v = \omega a$	231
	$v = \frac{\omega a}{2}$	77
Чему равна активная длина проводника, свернутого в прямоугольную рамку, которую мы рассматриваем?	$l = 2b$	241
	$l = b\omega$	78
	$l = 2b\omega$	251
Укажите выражение, которое получится, если найденные значения v и l подставить в формулировку Фарадея для закона электромагнитной индукции.	$e = BS\omega\omega$	79
	$e = B \cdot 2b\omega\omega$	261
	$e = E_m \sin \alpha$	80
	$e = E_m \sin \omega t$	271
Укажите график ЭДС, индуцируемой в обмотке генератора, при условии, что $B = B_m \sin \omega t$.		81
		281

3.6. Положение витка в магнитном поле и фаза переменной ЭДС

Фаза индуцированной синусоидальной ЭДС тесно связана с положением витка в магнитном поле машины. При этом существенное значение имеет положение витка в момент времени $t = 0$, с которого мы начинаем рассматривать индуцированную ЭДС.

На рис. 3.5 изображены три витка, находящиеся в магнитном поле машины, распределенном по синусоидальному закону. Витки сдвинуты в пространстве на 120° один относительно другого и укреплены на якоре, который вращается с угловой скоростью ω .

Начнем рассмотрение ЭДС, индуцируемых в витках, с того момента времени, когда первый виток совмещен с нейтралью, т.е. с линией, проходящей через точки, в которых магнитная индукция равна нулю.

Поскольку индукция B равна нулю, то и ЭДС, наводимая в этот момент времени в первом витке, равна нулю. То же самое можно установить и формальным путем. Действительно, при $t = 0$ имеем:

$$\alpha_1 = 0;$$

$$e_1 = E_m \sin \alpha_1 = E_m \sin 0.$$

В тот же момент времени во втором витке наводится ЭДС

$$e_{II} = E_m \sin \alpha_{II} = E_m \sin 120,$$

и в третьем витке — ЭДС

$$e_{III} = E_m \sin \alpha_{III} = E_m \sin 240.$$

С течением времени все три угла α_1 , α_{II} , α_{III} будут равномерно увеличиваться на величину $\alpha = \omega t$, при этом индуцированные в рамках ЭДС будут описываться формулами:

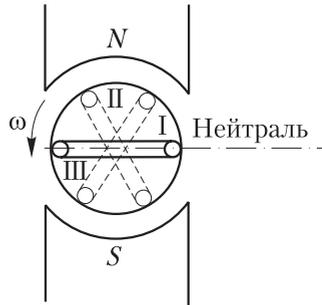


Рис. 3.5

$$e_I = E_m \sin(0^\circ + \omega t) = E_m \sin \omega t;$$

$$e_{II} = E_m \sin(120^\circ + \omega t) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ);$$

$$e_{III} = E_m \sin(240^\circ + \omega t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ).$$

Таким образом, фаза каждой ЭДС зависит от угла наклона рамки к нейтрали в начальный момент времени. Этот угол, соответствующий времени $t = 0$, принято обозначать буквой ψ . Мы уже говорили, что этот угол называется начальной фазой. Таким образом, для рассмотренного случая можно написать:

$$\psi_I = 0; \psi_{II} = 120^\circ = \frac{2\pi}{3}; \psi_{III} = -120^\circ = -\frac{2\pi}{3}.$$

Величина начальной фазы зависит от выбора начала отсчета. Так, например, полагая, что при $t = 0$ с нейтралью совмещена вторая рамка, получаем:

$$\psi_{II} = 0; \psi_I = -120^\circ; \psi_{III} = 120^\circ.$$

Карточка № 3.6 (384)

Положение витка в магнитном поле и фаза переменной ЭДС

В некоторый момент времени $e = E_m$. Как расположена рамка по отношению к полюсам машины в этот момент времени?	Плоскость рамки параллельна линии, соединяющей середины полюсов	82
	Плоскость рамки перпендикулярна линии, соединяющей середины полюсов	292
	Приведенных данных для ответа на вопрос недостаточно	83
В некоторый момент времени $e = 0$. Как расположена рамка по отношению к полюсам машины в этот момент времени?	Плоскость рамки параллельна линии, соединяющей середины полюсов	304
	Плоскость рамки перпендикулярна линии, соединяющей середины полюсов	84
	Приведенных данных для ответа на вопрос недостаточно	314

Продолжение карт. № 3.6

При $t = 0$ плоскость рамки перпендикулярна линии, соединяющей середины полюсов машины. Чему равна начальная фаза индуцируемой ЭДС?	0	85
	90°	324
	Приведенных данных для ответа на вопрос недостаточно	86
	ωt	302
Как зависит фаза индуцируемой ЭДС от скорости вращения рамки?	Прямо пропорционально	334
	Обратно пропорционально	87
	Не зависит	344
Как зависит начальная фаза индуцируемой ЭДС от скорости вращения рамки?	Прямо пропорционально	88
	Обратно пропорционально	354
	Не зависит	89

3.7. Способы графического изображения синусоидальных величин

Характер изменения синусоидальных ЭДС тока и напряжения с течением времени полностью определен формулами:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e);$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Если известны амплитудное значение величины, угловая частота и начальная фаза, то мгновенное значение величины может быть подсчитано для любого момента времени.

Недостаток формул — отсутствие наглядности. Для того чтобы наглядно представить себе характер изменения исследуемой величины, принято изображать рассматрива-

емые зависимости графически в прямоугольной системе координат.

На рис. 3.6 напряжение и ток изображены как функции времени. Из графика очевидно, что значения напряжения и тока начинают повторяться по истечении времени $t = T$, где T — период; ток достигает соответствующих состояний со сдвигом во времени по отношению к напряжению: например, $u = 0$ при $t = 0$, а $i = 0$ при $t = t_0$; $u = U_m$ при $t = \frac{T}{4}$, а $i = I_m$ при $t = \frac{T}{4} + t_0$ и т.д. (здесь $t_0 = \frac{\Psi_i}{\omega}$).

Графики типа, изображенного на рис. 3.6, применяются сравнительно редко. Практически значительно удобнее изображать ЭДС, напряжение или ток не в функции времени t , а в функции величины ωt , пропорциональной времени. При этом меняется только масштаб графика по оси времени, характер же изображенной зависимости полностью сохраняется (рис. 3.7).

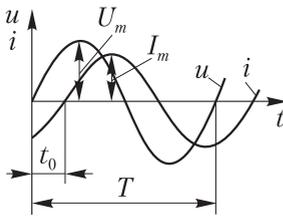


Рис. 3.6

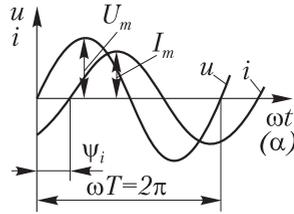


Рис. 3.7

Поскольку $\omega t = \alpha$, то мы можем рассматривать напряжение и ток, изображенные на графике, и как функции времени, и как функции угла поворота рамки. В частности, период величин, изображенных на графике, в новом масштабе времени равен ωT ; вместе с тем период синусоидальной величины, рассматриваемой как функция угла α , равен 2π . Таким образом,

$$\omega t = 2\pi,$$

откуда получаем

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

На последнем графике легко учесть начальную фазу. Она откладывается непосредственно в градусах или радианах на оси углов $\alpha = \omega t$, как это показано на рис. 3.8. При $\psi_e = 0$ начало координат помещалось бы в точке O' . При $\psi_e > 0$ мы как бы смещаем начало координат вправо на угол ψ_e . При $\psi_e < 0$ начало координат как бы смещается влево, в сторону отрицательных углов (рис. 3.9).

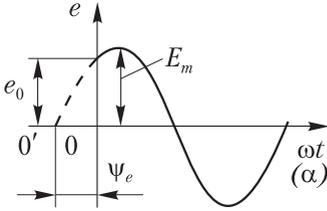


Рис. 3.8

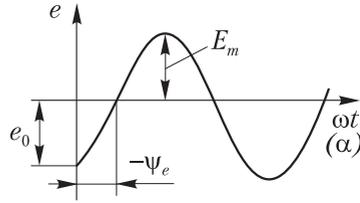


Рис. 3.9

Таким образом, на рис. 3.8 изображена синусоида

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e),$$

а на рис. 3.9 — синусоида

$$e = E_m \sin(\omega t - \psi_e).$$

При $t = 0$ из первой формулы получаем

$$e_0 = E_m \sin \psi_e,$$

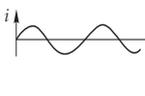
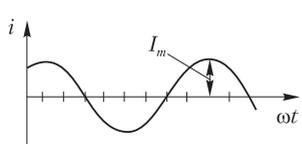
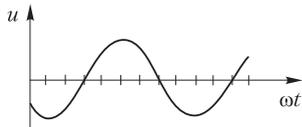
а из второй — соответственно

$$e_0 = E_m \sin(-\psi_e) = -E_m \sin \psi_e.$$

Важнейшее достоинство графиков, типа изображенного на рис. 3.7, 3.8, 3.9, заключается в том, что их легко связать с векторными диаграммами.

Карточка № 3.7 (230)

Способы графического изображения синусоидальных величин

$I_m = 2a;$ $\Psi_i = -90^\circ.$ Укажите график тока.		90
		364
		91
 $I_m = 2 \text{ A}.$ Укажите выражение для тока i .	$i = 2 \sin \omega t$	374
	$i = \sin(\omega t - 45^\circ)$	92
	$i = 2 \sin(\omega t + 45^\circ)$	384
	$i = 2 \cos \omega t$	93
 $U_m = 200 \text{ V}.$ Укажите выражение для напряжения u .	$u = 200 \cos \omega t$	390
	$u = -100 \cos \omega t$	94
	$u = 200 \sin(\omega t - 45^\circ)$	305
	$u = 100 \sin(\omega t + 45^\circ)$	95
$i = 2 \sin(\omega t + 30^\circ).$ Определите мгновенное значение тока при $t = 0$.	1 А	315
	2 А	96
	$2\sqrt{2}$ А	325
	Для решения недостаточно данных	97
$i = 2 \sin(\omega t + 30^\circ).$ Определите мгновенное значение тока при $t = T$. (T – период)	1 А	335
	2 А	98
	$2\sqrt{2}$ А	345
	Для решения недостаточно данных	99

3.8. Векторная диаграмма

При большом количестве токов и напряжений, действующих в электрической цепи, а также при необходимости складывать и вычитать синусоидальные токи или напряжения графики в прямоугольной системе координат оказываются неудобными.

Расчет цепи переменного тока значительно упрощается, если использовать векторные диаграммы. На векторных диаграммах синусоидальные токи и напряжения изображаются векторами, а сложение и вычитание синусоидальных величин заменяется сложением и вычитанием соответствующих векторов.

Говорят, что вектор изображает синусоиду, если выполнены следующие условия:

- модуль вектора равен амплитудному значению синусоидальной величины (в определенном масштабе);
- вектор наклонен к горизонтальной оси под углом, равным начальной фазе;
- вектор вращается против часовой стрелки с угловой скоростью, равной угловой частоте тока;
- берутся проекции вектора на вертикальную ось.

При этих условиях каждой синусоиде соответствует один определенный вектор и каждому вектору — синусоида.

На рис. 3.10 изображена синусоида тока

$$i = I_m \sin \omega t$$

и соответствующий ей вектор. Поскольку начальная фаза тока $\psi = 0$, вектор I_m совмещен с горизонтальной осью. При этом его проекция на вертикальную ось в начальный момент времени равна нулю. По истечении времени $t = \frac{T}{4}$ вектор повернется на угол $\frac{\omega T}{4} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$. При этом его проекция на вертикальную ось будет максимальной. Если величины проекций вектора изобразить как функции времени в прямоугольной системе координат, то получим синусоиду.

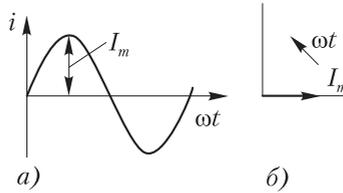


Рис. 3.10

На рис. 3.11 изображена синусоида тока

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

и соответствующий ей вектор. Вектор повернут на угол ψ относительно горизонтальной оси. При $t = 0$ проекция вектора на вертикальную ось равна

$$I_0 = I_m \sin \psi.$$

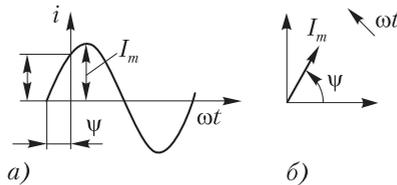


Рис. 3.11

В практике расчета электрических цепей начальная фаза часто не имеет существенного значения, но важен сдвиг по фазе между различными синусоидальными величинами. Этот сдвиг фаз легко определяется на векторной диаграмме (рис. 3.12). Например, если в ветви протекает ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

при напряжении на зажимах ветви

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

то разность фаз напряжения и тока или сдвиг по фазе φ определяется выражением

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i.$$

Таким образом, сдвиг по фазе можно найти как сдвиг начальных фаз.

Часто на векторных диаграммах учитывают только взаимное расположение векторов, а начальные фазы не помечают, как это сделано на рис. 3.13.

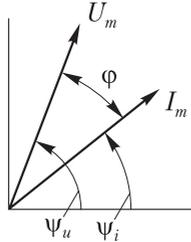


Рис. 3.12

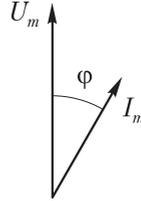
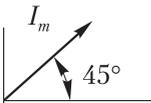
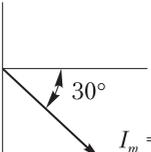
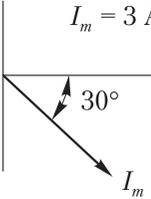
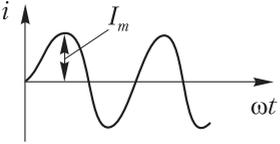
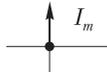
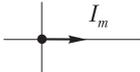
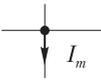
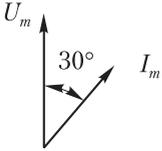


Рис. 3.13

Карточка № 3.8 (263)
Векторная диаграмма

 Укажите выражение для тока, изображаемого этим вектором.	$i = I_m \sin 45^\circ$	100
	$i = I_m \sin (\omega t + 45^\circ)$	355
	$i = I_m \sin (\omega t - 45^\circ)$	301
 Укажите выражение для тока, изображаемого этим вектором.	$i = -1 \text{ A}$	365
	$i = 2 \sin 30^\circ$	106
	$i = 2 \sin (\omega t + 30^\circ)$	376
	$i = 2 \sin (\omega t - 30^\circ)$	107
 Чему равно значение тока i при $t = 0$?	-1,5 A	386
	-1 A	108
	1 A	396
	3 A	109

Продолжение карт. № 3.8

 <p>Укажите вектор, изображающий эту синусоиду тока.</p>		401
		217
		400
		227
 <p>$u = U_m \sin \omega t$. Укажите выражение для тока i.</p>	$i = I_m \sin \omega t$	399
	$i = I_m \sin (\omega t + 30^\circ)$	237
	$i = I_m \sin (\omega t - 30^\circ)$	398
	Приведенных данных недостаточно для выполнения задания.	247

3.9. Сложение и вычитание синусоидальных величин

Если требуется сложить две синусоидальные величины, например токи:

$$i_1 = I_{m1} \sin (\omega t + \psi_1);$$

$$i_2 = I_{m2} \sin (\omega t + \psi_2),$$

то можно построить графики этих токов в прямоугольной системе координат, определить сумму токов i_1 и i_2 , соответствующую последовательным значениям времени, и по найденным данным построить кривую суммарного тока

(рис. 3.14). При таком построении приходится складывать мгновенные значения токов. Но мгновенные значения токов являются проекциями на вертикальную ось векторов, изображающих эти токи на векторной диаграмме, поэтому сложение мгновенных значений токов можно заменить сложением проекций соответствующих векторов.

На рис. 3.15 показано, что сумма проекций векторов I_1 и I_2 на вертикальную ось равна проекции вектора I , найденного векторным сложением по правилу параллелограмма.

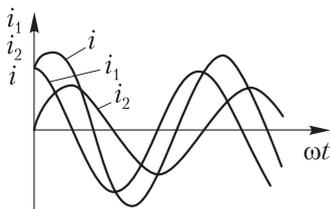


Рис. 3.14

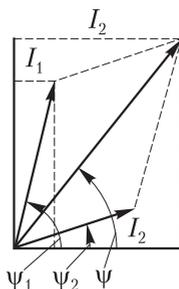


Рис. 3.15

Это обстоятельство значительно облегчает суммирование и вычитание синусоидальных токов (и любых синусоидальных величин). Действительно, сложив два вектора, изображающих синусоидальные токи, мы найдем вектор результирующего тока I , а затем, вращая вектор I с угловой скоростью ω и беря его проекции на вертикальную ось, найдем синусоиду результирующего тока

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

Вместо того чтобы складывать векторы I_1 и I_2 по правилу параллелограмма, можно поступить следующим образом: вектор I_2 перенести параллельно самому себе так, чтобы его начало совпало с концом вектора I_1 . Тогда, соединив начало вектора I_1 с концом вектора I_2 , получим суммарный вектор I (рис. 3.16). То же правило справедливо и для большего числа векторов. Так, например, чтобы сложить векторы I_1, I_2, I_3, I_4 (рис. 3.17, а) путем параллельного переноса, образуем из векторов ломаную линию и соединяем начало первого вектора с концом последнего (рис. 3.17, б).

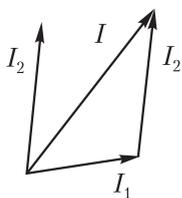
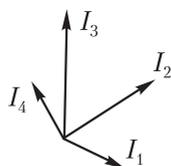
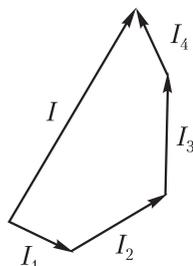


Рис. 3.16



а)



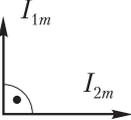
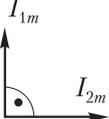
б)

Рис. 3.17

Полученный таким образом вектор I и будет равен векторной сумме данных векторов.

Карточка № 3.9 (208)

Сложение и вычитание синусоидальных величин

 $I_{1m} = 3 \text{ A};$ $I_{2m} = 4 \text{ A};$ $i = i_1 + i_2.$ Определите амплитуду тока i .	$I_m = 3 \text{ A}$	5
	$I_m = 4 \text{ A}$	105
	$I_m = 5 \text{ A}$	115
	$I_m = 7 \text{ A}$	125
$i_1 = 4 \sin(\omega t + 45^\circ);$ $i_2 = 3 \sin(\omega t - 45^\circ);$ $i = i_1 + i_2.$ Определите амплитуду тока i .	$I_m = 3 \text{ A}$	135
	$I_m = 4 \text{ A}$	145
	$I_m = 5 \text{ A}$	155
	$I_m = 7 \text{ A}$	165
 $I_{1m} = I_{2m};$ $i_2 = 5 \sin \omega t.$ Найдите выражение для тока $i = i_1 + i_2.$	$i = 5\sqrt{2} \sin \omega t$	175
	$i = 5\sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ)$	185
	$i = 10 \sin \omega t$	195
	Приведенных данных для выполнения задания недостаточно	106

Продолжение карт. № 3.9

$i_1 = 5 \sin \omega t$; $i_2 = 5 \sin (\omega t - 90^\circ)$; $i = i_1 + i_2$. Найдите выражение для тока i .	$i = 5\sqrt{2} \sin \omega t$	116
	$i = 5\sqrt{2} \sin (\omega t + 45^\circ)$	126
	$i = 5\sqrt{2} \sin (\omega t - 45^\circ)$	136
	$i = 5\sqrt{2} \sin (\omega t + 90^\circ)$	146
$u_1 = 8 \sin (\omega t + 45^\circ)$; $u_2 = 8 \sin (\omega t - 45^\circ)$; $u = u_1 + u_2$. Найдите выражение для напряжения.	$u = 8\sqrt{2} \sin \omega t$	117
	$u = 8\sqrt{2} \sin (\omega t + 45^\circ)$	127
	$u = 8\sqrt{2} \sin (\omega t - 45^\circ)$	137
	$u = 8\sqrt{2} \sin (\omega t + 90^\circ)$	147

3.10. Среднее значение переменного тока

Среднее значение переменного тока (ЭДС, напряжения) определим как среднее арифметическое мгновенных значений.

Нетрудно заметить, что среднее арифметическое значение переменного тока за целое число периодов равно нулю, так как каждому положительному мгновенному значению тока соответствует точно такое же отрицательное значение.

Поэтому, когда говорят о среднем значении переменного тока, имеют в виду среднее значение, определенное для половины периода.

Для определения среднего за определенный промежуток времени значения непрерывно изменяющейся величины используют следующий прием: находят площадь, ограниченную осью абсцисс и графиком переменной величины в пределах выбранного интервала времени; принимая вы-

бранный интервал оси абсцисс за основание, строят равно-
 великий прямоугольник; тогда
 высота прямоугольника будет
 равна среднему значению. Та-
 кое построение для половины
 периода синусоидального тока
 приведено на рис. 3.18.

Полагая $\omega t = \alpha$ и $\omega T = 2\pi$,
 получаем площадь прямо-
 угольника

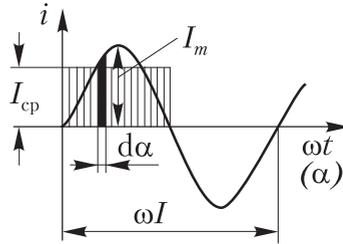


Рис. 3.18

$$S_{\text{пря}} = I_{\text{cp}} \cdot \frac{2\pi}{\omega} = I_{\text{cp}} \pi;$$

площадь, ограниченную положительной полуволной синусоиды

$$S_{\text{с}} = \int_0^{\pi} I_m \sin \alpha d\alpha = I_m \int_0^{\pi} -\cos \alpha d\alpha = 2I_m.$$

Приравнивая площади, получаем

$$I_{\text{cp}} \pi = 2I_m,$$

откуда находим

$$I_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m.$$

Совершенно аналогично можно показать, что

$$U_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} U_m = 0,637 U_m;$$

$$E_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} E_m = 0,637 E_m.$$

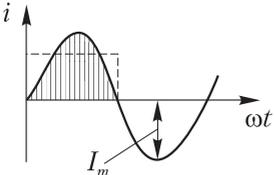
Среднее значение переменного тока, ЭДС и напряжения используется при исследовании работы или расчете выпрямителей, фильтров, электрических машин, статических умножителей напряжения и др.

При подсчете работы и мощности электрического тока средние значения тока, напряжения и ЭДС не используются.

Среднее значение синусоидальной величины принято обозначать соответствующей большой буквой с индексом: $I_{\text{cp}}, U_{\text{cp}}, E_{\text{cp}}$.

Карточка № 3.10 (204)

Среднее значение переменного тока

Частота переменного тока $f = 50$ Гц. Чему равно среднее за 1 с значение тока?	0	208
	1 А	218
	2 А	228
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	238
Частота переменного тока $f = 50$ Гц. Чему равно среднее за 1,01 с значение тока?	0	248
	1 А	49
	2 А	109
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	119
 <p>Чему равна высота прямоугольника, равновеликого заштрихованной фигуре?</p>	Среднему значению тока	129
	$\frac{I_m}{2}$	139
	$\frac{I_m}{3}$	149
$i = 3,14 \sin \omega t$. Определите среднее значение тока.	1 А	151
	2 А	161
	3,14 А	171
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	181
$u = 314 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$. Определите среднее значение напряжения.	100 В	182
	200 В	187
	314 В	191
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	208

3.11. Действующее значение переменного тока

Действующим значением переменного тока назовем такой постоянный ток, который выделяет в сопротивлении R за время T столько же тепла, сколько переменный ток при тех же условиях. Здесь T — период переменного тока.

В соответствии с законом Джоуля — Ленца за время dt выделяют тепло:

– постоянный ток

$$dQ = 0,24I^2 R dt;$$

– переменный ток

$$dQ = 0,24i^2 R dt.$$

За время одного периода T выделяют тепло

– постоянный ток

$$Q = \int_0^T 0,24I^2 R dt = 0,24I^2 R \int_0^T dt = 0,24I^2 RT;$$

– переменный ток

$$dQ = \int_0^T 0,24i^2 R dt = 0,24R \int_0^T i^2 dt.$$

Приравнивая количество выделяемого тепла, получаем

$$0,24I^2 RT = 0,24R \int_0^T i^2 dt.$$

откуда находим

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Вычислим интеграл:

$$\begin{aligned} \int_0^T i^2 dt &= \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt = I_m^2 \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \\ &= I_m^2 \int_0^T \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt = I_m^2 \left(\frac{T}{2} - \int_0^T \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right) = \frac{I_m^2 T}{2}, \end{aligned}$$

так как

$$\int_0^T \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t = \frac{\sin 2\omega T - \sin 0}{2\omega} = 0.$$

Осуществив подстановку, найдем

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{I_m^2 T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Таким образом, действующее значение тока совпадает с его среднеквадратичным значением.

По аналогии говорят о действующих значениях ЭДС и напряжения:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Совпадение действующего и среднеквадратичного значений переменного тока соответствует тому факту, что количество выделяемого тепла пропорционально квадрату тока.

Практически среднеквадратичное и действующее значения переменного тока не различают. Тем не менее можно сказать, что среднеквадратичное значение выводится на основании формальных математических соображений, в то время как действующее значение имеет вполне определенный физический смысл.

Карточка № 3.11 (312)

Действующее значение переменного тока

Нагревательный элемент, потребляющий 5 А постоянного тока, доводит 1 л воды до кипения за 10 мин. Тот же эффект был получен при питании нагревателя переменным током. Укажите действующее значение переменного тока.	Для ответа на вопрос недостаточно данных	350
	5 А	390
	25 А	360
	10 А	140

Продолжение карт. № 3.11

Тот же нагреватель при питании переменным током доводит до кипения 4 л воды за 10 мин. Укажите действующее значение тока (температура воды до нагрева в обоих случаях одинакова).	Для ответа на вопрос недостаточно данных	200
	5 А	210
	10 А	220
	20 А	230
$i = 100 \sin \omega t$. Чему равно действующее значение этого тока?	100	140
	100 А	250
	70,7 А	360
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	170
Действующее значение напряжения $U = 100$ В. Определите амплитуду напряжения.	70,7 В	178
	100 В	188
	141 В	98
	707 В	109
$I = 10$ А; $\psi_i = 45^\circ$; $\omega = 314$ с ⁻¹ . Напишите выражение для синусоидального тока, удовлетворяющее приведенным данным.	$i = 10 \sin 314t$	24
	$i = 10 \sin (314t + 45^\circ)$	134
	$i = 14,1 \sin (314t + 45^\circ)$	144
	$i = I_m \sin (\omega t + \psi_i)$	54

3.12. Коэффициент формы кривой. Коэффициент амплитуды

Действующее значение переменного тока, напряжения, ЭДС является одной из основных практических характеристик этих физических величин. Действующее значение имеют в виду, когда указывают напряжение сети переменного тока, ток, потребляемый асинхронным или синхронным двигателем, номинальные данные трансформатора и

т.д. Электроизмерительные приборы, как правило, градуируются в действующих значениях измеряемых величин. Иная градуировка обязательно оговаривается особо.

Во многих случаях в электрических цепях возникают напряжения или токи, форма которых отклоняется от синусоидального закона. Для характеристики таких напряжений и токов вводят коэффициент формы кривой κ_Φ , под которым понимают отношение действующего значения периодической функции за период к ее среднему значению:

$$\kappa_\Phi = \frac{I}{I_{\text{ср}}}; \quad \kappa_\Phi = \frac{U}{U_{\text{ср}}}.$$

Определим κ_Φ для синусоиды:

$$\kappa_\Phi = \frac{I}{I_{\text{ср}}} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Для прямоугольных импульсов напряжения $\kappa_\Phi = 1$ и т.д.

Для характеристики формы периодической кривой используется также коэффициент амплитуды κ_a , который определяют как отношение амплитудного к действующему значению

$$\kappa_a = \frac{I_m}{I}; \quad \kappa_a = \frac{U_m}{U} \text{ и т.д.}$$

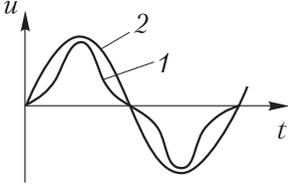
Для синусоидальных кривых $\kappa_a = \sqrt{2}$. Если кривая имеет более острую форму, чем синусоида, то $\kappa_a > \sqrt{2}$, если кривая имеет более тупую форму, чем синусоида (приближается к прямоугольному импульсу), то $\kappa_a < \sqrt{2}$.

Для прямоугольной формы импульсов $\kappa_a = 1$.

В заключение отметим, что в дальнейшем векторные диаграммы будем строить для действующих значений синусоидальных величин.

Карточка № 3.12 (219)

Коэффициент формы кривой. Коэффициент амплитуды

Напряжение сети переменного тока $U = 220$ В? Укажите максимальное напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся к клеммам сети.	220 В	37
	310 В	147
	360 В	57
	450 В	167
Конденсатор пробивается при напряжении 150 В. Можно ли такой конденсатор подсоединить к линии переменного тока напряжением $U = 127$ В?	Можно	38
	Нельзя	148
$I_{\text{cp}} = 1$ А. Замеренное амперметром значение этого же тока равно 1,11 А. Определите коэффициент формы кривой тока.	1	59
	1,11	69
	0,9	179
	Задача не определена	289
$u = 100 \sin(314t + 30^\circ)$. Определите коэффициент амплитуды этого напряжения.	1	301
	1,11	311
	1,41	221
	Для определения коэффициента амплитуды недостаточно данных	131
 <p>Какая кривая имеет больший коэффициент амплитуды?</p>	1	234
	2	244

3.13. Активное сопротивление, индуктивность и емкость — параметры электрических цепей переменного тока

Под параметром понимают физическую величину, которая характеризует определенные свойства изучаемого явления или объекта.

Свойство элементов цепи постоянного тока препятствовать движению электрических зарядов мы характеризовали активным сопротивлением r . В других параметрах не было необходимости, так как наличие индуктивности в цепи постоянного тока никак не отражалось на характеристиках установившегося режима, а включение в цепь конденсатора при установившемся режиме было равносильно обрыву цепи.

Для характеристики цепи переменного тока одного параметра — активного сопротивления r — недостаточно.

При протекании через катушку индуктивности переменного тока в ней наводится ЭДС самоиндукции, которую необходимо учитывать, так как для ее компенсации требуется напряжение

$$U_L = L \frac{di}{dt},$$

где L — индуктивность катушки, $\frac{di}{dt}$ — скорость изменения тока в цепи.

Для переменного тока конденсатор представляет собой конечное сопротивление, величина которого и падение напряжения на котором зависят от емкости конденсатора C .

Активное сопротивление r , индуктивность L и емкость C являются параметрами цепи переменного тока.

Следует отметить, что любой участок электрической цепи обладает активным сопротивлением, емкостью и индуктивностью, однако во многих случаях некоторыми из этих параметров можно пренебречь. Так, например, при практических расчетах можно пренебречь индуктивностью и активным сопротивлением конденсатора и учитывать только его емкостное сопротивление; можно пренебречь межвитковой емкостью катушки и учитывать только ее активное и индуктивное сопротивления; можно пренебречь индуктивностью и емкостью реостата или нити лампы накаливания и учитывать только их активное сопротивление.

В общем случае необходимо одновременно учитывать влияние всех трех параметров электрической цепи переменного тока.

Карточка № 3.13 (292)

Активное сопротивление, индуктивность и емкость — параметры электрических цепей переменного тока

Каким сопротивлением обладает конденсатор в цепи постоянного тока?	0	331
	∞	241
Параметры катушки индуктивности r и L известны. Чему равно сопротивление катушки постоянному току?	0	251
	∞	261
	r	171
Какими величинами характеризуется цепь переменного тока в общем случае?	r	42
	r, L	82
	L, C	153
	r, L, C	272
Какими параметрами практически характеризуется катушка индуктивности?	r	82
	r, L	192
	L, C	203
	r, L, C	13
Какими параметрами практически характеризуется конденсатор?	C	16
	r, C	27
	L, C	35
	r, L, C	144

3.14. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Активное сопротивление характеризуется тем, что протекающий по нему ток и падение напряжения связаны линейной зависимостью, экспериментально установленной Г. С. Омом. Эту зависимость при рассмотрении цепей постоянного тока мы записывали в виде

$$U = rI.$$

Эта зависимость в каждый данный момент времени остается справедливой и для любого изменяющегося тока, следовательно, обозначая соответствующими малыми бук-

вами мгновенные значения тока и напряжения, мы можем написать

$$u = ri; i = \frac{u}{r}.$$

Если приложенное к активному сопротивлению напряжение изменяется по синусоидальному закону

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то по такому же закону изменяется и ток, протекающий через это сопротивление:

$$i = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

Таким образом,

$$I_m = \frac{U_m}{r}; I = \frac{U}{r},$$

где

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

– действующие значения тока и напряжения.

Цепь переменного тока с активным сопротивлением изображена на рис. 3.19. Мы установили, что ток и напряжение в такой цепи с течением времени изменяются по одному и тому же закону, следовательно, совпадают по фазе. Характер изменения тока и напряжения показан на рис. 3.20. На рис. 3.21 изображена векторная диаграмма тока и напряжения в рассматриваемой цепи.

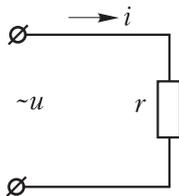


Рис. 3.19

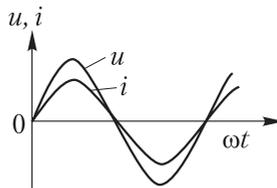


Рис. 3.20

Скорость поступления энергии источника в электрическую цепь (количество энергии, поступающей в цепь за 1 с) называют электрической мощностью:

$$p = ui.$$

Будем считать положительной мощность, поступающую от источника в цепь, и отрицательной — мощность, поступающую из цепи в источник. Поскольку в цепи с активным сопротивлением в любой момент времени ток и напряжение имеют одинаковые знаки, то мощность всегда положительна (рис. 3.22).



Рис. 3.21

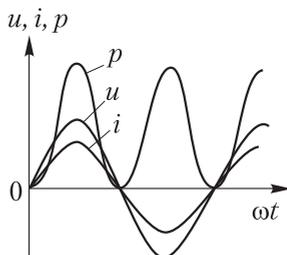
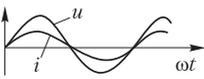
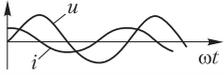
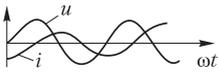


Рис. 3.22

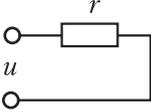
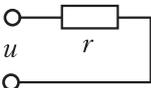
Таким образом, в рассматриваемом случае энергия источника непрерывно поступает в электрическую цепь и выделяется в активном сопротивлении в виде тепла.

Карточка № 3.14 (165)

Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Какой из графиков характеризует цепь переменного тока с активным сопротивлением?		154
		163
		178

Продолжение карт. № 3.14

 <p> $u = 141 \sin \omega t$; $r = 10 \text{ Ом}$. Найдите действующее значение тока в цепи. </p>	14,1 А	61
	100 А	371
	10 А	219
	1 А	120
 <p> Действующее значение тока в цепи $I = 7,07 \text{ А}$; $r = 10 \text{ Ом}$. Найдите амплитуду приложенного напряжения. </p>	70,7 В	130
	10 В	141
	100 В	251
	707 В	61
Укажите векторную диаграмму для цепи переменного тока с активным сопротивлением.		17
		307
		127
		137

Окончание карт. № 3.14

Мощность, потребляемая электрической цепью, равна 100 Вт. Действующее значение тока в цепи $I = 2$ А. Чему равно активное сопротивление цепи?	100 Ом	14
	50 Ом	124
	25 Ом	134
	400 Ом	41

3.15. Цепь переменного тока с индуктивностью

Идеализованная электрическая цепь, которая характеризуется только индуктивностью и имеет емкость и активное сопротивление, равные нулю, изображена на рис. 3.23.

Ток и напряжение в такой цепи связаны соотношением, вытекающим из закона электромагнитной индукции:

$$u = L \frac{di}{dt}.$$

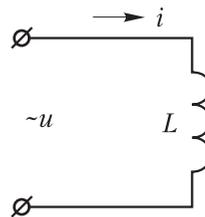


Рис. 3.23

Найдем напряжение, приложенное к цепи, при условии, что ток изменяется по синусоидальному закону $i = I_m \sin \omega t$:

$$u = L \frac{d}{dt} (I_m \sin \omega t) = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \cos \omega t = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$u = U_m \sin (\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, приложенное к цепи напряжение изображается косинусоидой. Графики тока и напряжения в рассматриваемой цепи представлены на рис. 3.24. Векторная диаграмма, соответствующая этим графикам, приведена на рис. 3.25.

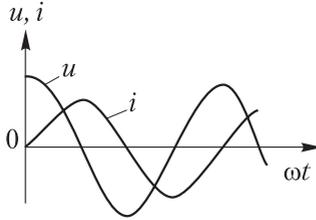


Рис. 3.24

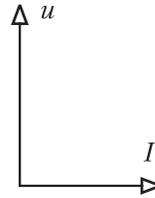


Рис. 3.25

Формулы, график и векторная диаграмма показывают, что в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения по фазе на угол 90° .

Из приведенных выше соотношений следует:

$$U_m = \omega L I_m; I_m = \frac{U_m}{\omega L}.$$

Величину ωL , имеющую размерность сопротивления (Ом), называют индуктивным сопротивлением и обозначают x_L .

Таким образом,

$$x_L = \omega L.$$

Следовательно,

$$I_m = \frac{U_m}{x_L},$$

Поделив левую и правую части последнего равенства на $\sqrt{2}$, получим выражение

$$I = \frac{U}{x_L},$$

которое называют законом Ома для цепи с индуктивностью. Здесь I и U — действующие значения тока и напряжения.

На рис. 3.26 видно, что в рассматриваемом случае мощность источника в течение половины периода положительна (когда ток и напряжение имеют одинаковые знаки) и в течение другой половины периода — отрицательна (ток и напряжение имеют противоположные знаки). Это означает, что в течение первой половины периода энергия от источника поступает в сеть и накапливается в магнитном поле

катушки, а в течение второй половины периода энергия из сети возвращается источнику.

Среднее значение энергии, отдаваемой источником в течение периода, равно нулю. Энергия источника не расходуется.

Процесс обмена энергией между источником и цепью, не сопровождающийся преобразованием

электрической энергии в другие виды (механическую, тепловую, химическую и т.д.), характеризуется реактивной мощностью, под которой понимают количество энергии, поступающей из источника в цепь или возвращаемой цепи источнику в течение одной секунды.

Идеальная катушка индуктивности потребляет чисто реактивную мощность.

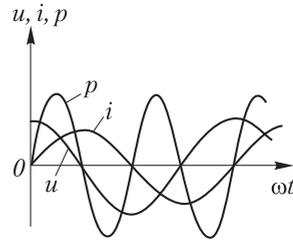


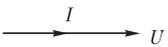
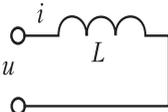
Рис. 3.26

Карточка № 3.15 (209)

Цепь переменного тока с индуктивностью

		202
<p>Укажите на графике тока точки, соответствующие максимуму напряжения.</p>		112
<p>Какой из графиков характеризует цепь переменного тока с индуктивностью?</p>		22
		232
		142

Продолжение карт. № 3.15

Укажите векторную диаграмму для цепи переменного тока с индуктивностью.		156
		166
		276
		386
Индуктивность катушки равна 10 миллигенри (0,01 Ом·с). Частота тока равна 50 Гц (314 с ⁻¹). Чему равно индуктивное сопротивление катушки?	100 Ом	28
	314 Ом	108
	31,4 Ом	118
	3,14 Ом	38
 $u = 100 \sin \omega t$; $x_L = 10 \text{ Ом}$. Напишите выражение для тока в цепи.	$i = 10 \sin \omega t$	148
	$i = 100 \sin \omega t$	258
	$i = 10 \sin (\omega t - 90^\circ)$	61
	$i = 10 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$	178

3.16. Цепь переменного тока с емкостью

На рис. 3.27 изображена идеализированная электрическая цепь, которая характеризуется только емкостью и имеет активное сопротивление и индуктивность, равные нулю.

По определению

$$i = \frac{dq}{dt},$$

где Q — заряд конденсатора, связанный с напряжением на его обкладках соотношением

$$q = Cu.$$

После подстановки получим

$$i = C \frac{du}{dt}.$$

Найдем ток в цепи при условии, что приложенное напряжение изменяется по синусоидальному закону $u = U_m \sin \omega t$:

$$i = C \frac{d}{dt}(U_m \sin \omega t) = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \cos \omega t = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

$$i = I_m \sin (\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, в рассматриваемом случае ток в цепи изображается косинусоидой. Графики тока и напряжения представлены на рис. 3.28. Векторная диаграмма, соответствующая этим графикам, приведена на рис. 3.29.

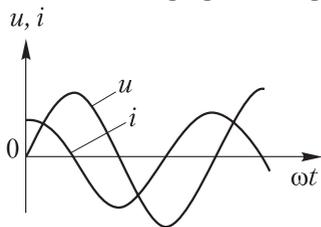


Рис. 3.28

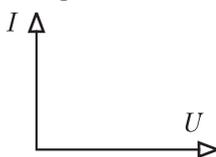


Рис. 3.29

Формулы, график и векторная диаграмма показывают, что в цепи с емкостью напряжение отстает от тока по фазе на угол 90° .

Из приведенных выше соотношений следует

$$I_m = \omega C U_m; \quad I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$$

Величину $\frac{1}{\omega C}$, имеющую размерность сопротивления (Ом), называют емкостным сопротивлением и обозначают x_C . Таким образом,

$$x_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Следовательно,

$$I_m = \frac{U_m}{x_C}.$$

Поделив левую и правую части последнего равенства на $\sqrt{2}$, получим выражение

$$I = \frac{U}{x_C},$$

которое называют законом Ома для цепи с емкостью.

Из рис. 3.30 очевидно, что в рассматриваемом случае мощность источника в течение половины периода положительна (когда ток и напряжение имеют одинаковые знаки) и в течение другой половины периода — отрицательна (ток и напряжение имеют противоположные знаки). Это означает, что в течение первой половины периода энергия от источника поступает в цепь и накапливается в электрическом поле конденсатора, а в течение второй половины периода энергия из сети возвращается источнику.

Среднее значение энергии, отдаваемой источником в течение

периода, равно нулю. Энергия источника не расходуется.

Идеальный конденсатор потребляет чисто реактивную мощность.

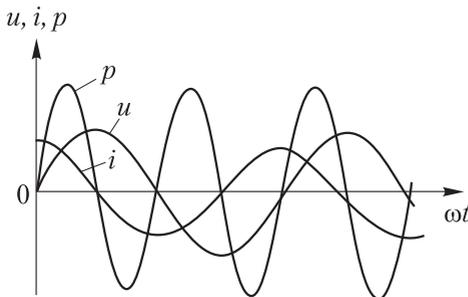
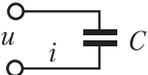
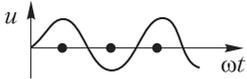


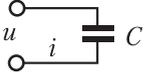
Рис. 3.30

Карточка № 3.16 (281)

Цепь переменного тока с емкостью

 <p>Укажите на графике напряжения точки, в которых ток максимален.</p>		22
<p>Какой из графиков характеризует цепь переменного тока с емкостью?</p>		142
<p>Какой из графиков характеризует цепь переменного тока с емкостью?</p>		64
		254
		155
<p>Укажите векторную диаграмму для цепи переменного тока с емкостью.</p>		69
		189
		199
<p>$C = 10 \text{ мкФ} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ с/Ом};$ $f = 5000 \text{ Гц} = 31\,400 \text{ с}^{-1}.$ Чему равно сопротивление конденсатора?</p>	314 Ом	103
	3,14 Ом	13
	1/0,314 Ом	123
	$5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$	233

Продолжение карт. № 3.16

	$i = 10 \sin \omega t$	143
	$i = 100 \sin \omega t$	53
$u = 100 \sin \omega t;$ $x_C = 10 \text{ Ом.}$	$i = 10 \sin (\omega t - 90^\circ)$	163
Напишите вы- ражение для тока в цепи.	$i = 10 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$	73

3.17. Цепь переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости. Треугольник сопротивлений

В общем случае неразветвленная цепь переменного тока содержит последовательно соединенные реостаты, конденсаторы и катушки индуктивности. Параметры этих элементов r , C , L представлены на схеме замещения, которая изображена на рис. 3.31.

Установим связь между приложенным напряжением, током в цепи и сопротивлением ее элементов.

Из второго закона Кирхгофа следует, что приложенное к цепи напряжение равно сумме падений напряжения на отдельных ее элементах:

$$u = u_r + u_L + u_C.$$

Здесь u_r , u_L , u_C — мгновенные значения соответствующих напряжений.

В символической форме это уравнение может быть записано и для действующих значений этих напряжений:

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Таким образом, вектор, изображающий приложенное к цепи напряжение, образуется как сумма трех векторов. Для сложения векторов можно воспользоваться следующим

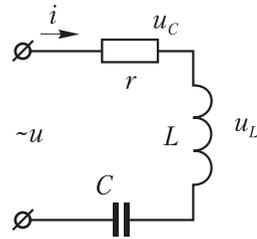


Рис. 3.31

правилом: чтобы сложить несколько векторов, достаточно параллельным переносом совместить начало второго вектора с концом первого, начало третьего с концом второго и т.д. (рис. 3.32); тогда суммарный (резльтирующий) вектор будет равен вектору OA , соединяющему начало первого вектора с концом последнего.

Применяя это правило, построим векторную диаграмму для рассматриваемой цепи. Построение начнем с вектора тока \dot{I} . Диаграмма изображена на рис. 3.33. Здесь вектор \dot{U}_r совпадает по направлению с вектором тока, вектор \dot{U}_L опережает вектор тока на 90° , а вектор \dot{U}_C на 90° отстает от вектора тока.

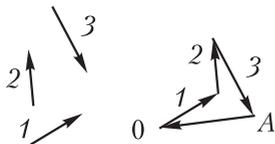


Рис. 3.32

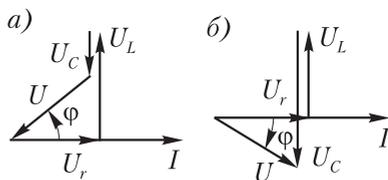


Рис. 3.33

Угол φ между векторами U и I равен углу сдвига по фазе между током в цепи и напряжением на ее зажимах. Отсчет угла φ ведется от вектора тока. При этом угол, отсчитываемый по часовой стрелке, считается отрицательным, а угол, отсчитываемый против часовой стрелки, — положительным. Из рис. 3.33 очевидно, что в случае, когда $U_L > U_C$, угол φ положителен, $\varphi > 0$ (рис. 3.33, а), а если $U_C > U_L$, то угол φ будет отрицательным, $\varphi < 0$ (рис. 3.33, б).

Выделим на векторной диаграмме треугольник со сторонами U , U_r и $(U_L - U_C)$. Этот треугольник, изображенный отдельно на рис. 3.34, принято называть треугольником напряжений. Поделим все стороны этого треугольника на действующее значение тока в рассматриваемой цепи.

Тогда получим подобный треугольник со сторонами:

$$\frac{U}{I}, \frac{U_r}{I}, \left| \frac{U_L - U_C}{I} \right|.$$

Но в соответствии с изложенным в 3.14, 3.15, 3.16

$$\frac{U_r}{I} = r; \quad \frac{U_L}{I} = X_L; \quad \frac{U_C}{I} = X_C.$$

Введем новые обозначения: величину $z = \frac{U}{I}$ назовем полным сопротивлением цепи, а величину

$$x = x_L - x_C = \frac{U_L}{I} - \frac{U_C}{I}$$

– реактивным сопротивлением.

Таким образом, стороны получившегося подобного треугольника равны соответственно z , r , x (рис. 3.35).

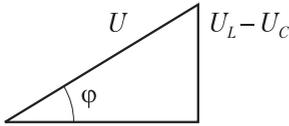


Рис. 3.34

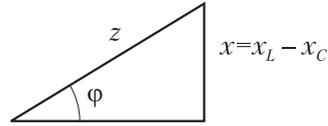


Рис. 3.35

Из прямоугольного треугольника сопротивлений легко находятся два важных соотношения:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}.$$

Первое соотношение (позволяет найти полное сопротивление цепи по известным ее параметрам r , L , C):

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2};$$

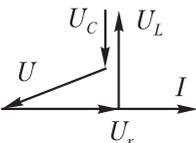
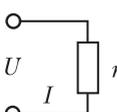
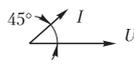
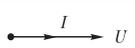
второе соотношение позволяет найти угол сдвига по фазе между приложенным напряжением и током в цепи:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}.$$

Карточка № 3.17 (339)

Цепь переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.

Треугольник сопротивлений

 <p>Приведенная векторная диаграмма соответствует случаю, когда</p>	$x_L > x_C$	297
	$x_L < x_C$	87
	$\omega L = \frac{1}{\omega C}$	177
	$L > C$	109
$x_L = 5 \text{ Ом};$ $x_C = 10 \text{ Ом}.$ Определите реактивное сопротивление цепи.	$x = -5 \text{ Ом}$	117
	$x = 5 \text{ Ом}$	127
	$x = \sqrt{125} \text{ Ом}$	38
	$x = 15 \text{ Ом}$	248
$r = 3 \text{ Ом};$ $x = -4 \text{ Ом}.$ Определите полное сопротивление цепи.	$z = -1 \text{ Ом}$	52
	$z = 5 \text{ Ом}$	162
	$z = 7 \text{ Ом}$	72
	$z = 25 \text{ Ом}$	282
 <p>Определите угол сдвига по фазе между током и напряжением в этой ветви.</p>	$x = -4 \text{ Ом};$ $r = 4 \text{ Ом}.$ $\varphi = 0$	45
	$\varphi = 90^\circ$	56
	$\varphi = 45'$	166
	$\varphi = -45^\circ$	172
Укажите векторную диаграмму для цепи, рассмотренной в предыдущем вопросе.		91
		101
		211
		221

3.18. Закон Ома для цепи переменного тока. Зависимость фазы тока от параметров цепи

Соотношение, связывающее полное сопротивление цепи z , ток и напряжение на ее зажимах, называют законом Ома для цепи переменного тока:

$$z = \frac{U}{I}; I = \frac{U}{z}; U = Iz$$

Здесь U и I — действующие значения напряжения и тока.

Закон Ома для цепи переменного тока часто записывают в развернутом виде:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Напомним, что буквой r обозначают активное сопротивление цепи. Его физическая сущность и механизм возникновения те же, что в цепях постоянного тока. Переносящие электрический заряд частицы отдают часть своей энергии молекулам вещества, повышая его температуру.

Символами x_L и x_C обозначают индуктивное и емкостное сопротивления цепи. Эти сопротивления связаны с появлением ЭДС самоиндукции катушки и напряжения на обкладках заряженного конденсатора, препятствующих движению заряженных частиц.

Полное сопротивление цепи z выражает суммарный эффект действия всех факторов, препятствующих движению заряженных частиц, ограничивающих величину тока в цепи.

Ранее мы установили, что в цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе, в цепи с индуктивностью ток по фазе отстает от напряжения на 90° , в цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на угол 90° .

В общем случае в цепи, содержащей все три элемента, ток может опережать напряжение по фазе (на угол, меньший 90°), может совпадать по фазе с напряжением и может отставать от напряжения на угол, меньший 90° .

При этом угол φ удобнее и проще всего определять по его тангенсу, как было показано в предыдущем параграфе:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{x}{r}.$$

Если в цепи преобладает индуктивное сопротивление, т.е. $x_L > x_C$ то $\operatorname{tg}\varphi$ и угол φ положительны. Это означает, что напряжение опережает по фазе ток (см. рис. 3.33, а). В этом случае говорят, что цепь в целом имеет индуктивный характер.

Если в цепи преобладает емкостное сопротивление, т.е. $x_C > x_L$, то $\operatorname{tg}\varphi$ и угол φ будут отрицательными (см. рис. 3.33, б), а напряжение будет отставать по фазе от тока. В этом случае говорят, что цепь имеет емкостной характер.

Если $x_L = x_C$ то $\operatorname{tg}\varphi = 0$ и $\varphi = 0$. При этом ток в цепи и напряжение на ее зажимах совпадают по фазе.

Угол φ может быть определен также по его синусу или косинусу. Из треугольника сопротивлений находим

$$\sin\varphi = \frac{x}{z}; \quad \cos\varphi = \frac{r}{z}.$$

Следует отметить, что выражения

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{r} \quad \text{и} \quad \sin\varphi = \frac{x}{z}$$

позволяют определить не только величину угла φ , но и его знак и, следовательно, характер цепи. Выражение

$$\cos\varphi = \frac{r}{z}$$

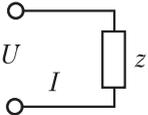
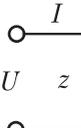
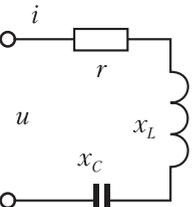
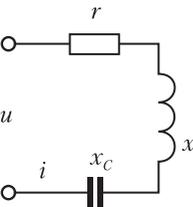
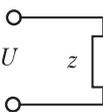
позволяет найти только величину угла.

При расчете цепей часто приходится решать и обратную задачу: по известному углу φ и полному сопротивлению z находить активное и реактивное сопротивления цепи:

$$r = z\cos\varphi; \quad x = z\sin\varphi.$$

Карточка № 3.18 (171)

Закон Ома для цепи переменного тока. Зависимость фазы тока от параметров цепи

 <p>$U = 100 \text{ В};$ $z = 20 \text{ Ом}.$</p> <p>Определите ток в цепи.</p>	$I = 5 \text{ А}$	322
	$I = 10 \text{ А}$	345
	$I = 20 \text{ А}$	156
	$I = 50 \text{ А}$	66
 <p>$z = 3 \text{ Ом};$ $x = 4 \text{ Ом};$ $U = 100 \text{ В}.$</p> <p>Определите падение напряжения на активном сопротивлении.</p>	20 В	7
	40 В	17
	60 В	118
	80 В	28
 <p>$x_L = 5 \text{ Ом};$ $x_C = 2 \text{ Ом}.$</p> <p>Как изменяется ток в цепи?</p>	Опережает напряжение по фазе	12
	Отстает от напряжения по фазе	42
	Совпадает с напряжением по фазе	152
 <p>$x_L = 2 \text{ Ом};$ $x_C = 5 \text{ Ом}.$</p> <p>Как изменяется ток в цепи?</p>	Опережает напряжение по фазе	71
	Отстает от напряжения по фазе	182
	Совпадает с напряжением по фазе	93
 <p>$r = 5 \text{ Ом};$ $x = -4 \text{ Ом}.$</p> <p>Как изменяется ток в цепи?</p>	Опережает напряжение по фазе	18
	Отстает от напряжения по фазе	218
	Совпадает с напряжением по фазе	129

3.19. Мощность в цепи переменного тока

Мощность постоянного тока определяется выражением

$$P = UI.$$

То же выражение справедливо и для переменного тока: $p = ui$. Поскольку ток в цепи и напряжение непрерывно меняются, то и мощность p — величина переменная.

Найдем закон изменения p в цепи синусоидального тока. Пусть

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t; \\ u &= U_m \sin(\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Тогда

$$p = I_m U_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi).$$

Учитывая, что

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta),$$

выражение для мощности можно привести к следующему виду:

$$p = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi).$$

Поскольку

$$U_m = \sqrt{2}U \text{ и } I_m = \sqrt{2}I,$$

то

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi).$$

Закон изменения мгновенной мощности в цепи с течением времени графически представлен на рис. 3.36.

Нетрудно видеть, что среднее значение мощности p за период равно первому члену правой части последнего равенства $UI \cos \varphi$, так как вторая составляющая мощности $UI \cos(2\omega t + \varphi)$ колеблется по закону косинуса (с двойной частотой) и ее среднее значение за период равно нулю.

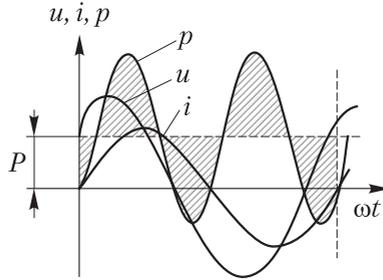


Рис. 3.36

Среднее значение мощности в цепи переменного тока называют активной мощностью и обозначают большой буквой P . Таким образом,

$$P = UI \cos \varphi.$$

Активная мощность поступает от источника в сеть и преобразуется в ней в другие виды энергии. В цепи с индуктивностью и в цепи с емкостью $P = 0$, так как $\cos(\pm 90^\circ) = 0$. В цепи с чисто активным сопротивлением $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$ и источник отдает в сеть максимально возможную мощность. Это максимальное значение мощности источника называют полной мощностью и обозначают буквой S :

$$S = UI.$$

Умножим все стороны треугольника напряжений на действующее значение тока (рис. 3.37). В результате получим подобный треугольник, изображенный на рис. 3.38. Гипотенуза этого прямоугольного треугольника выражает полную мощность цепи S . Прилежащий катет равен активной мощности

$$U_r I = UI \cos \varphi = P.$$

Величину

$$(U_L - U_C) I = UI \sin \varphi$$

называют реактивной мощностью и обозначают буквой Q .

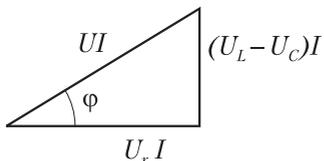


Рис. 3.37

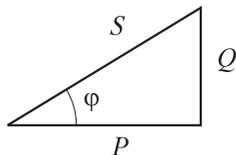


Рис. 3.38

Таким образом, противолежащий катет равен реактивной мощности:

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Прямоугольный треугольник со сторонами S , P , Q (рис. 3.38) называют треугольником мощностей.

Из этого треугольника находим:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}.$$

Если с помощью ваттметра измерить активную мощность, а с помощью амперметра и вольтметра — ток и напряжение в сети, то последняя формула позволяет подсчитать $\cos \varphi$.

Карточка № 3.19 (199)

Мощность в цепи переменного тока

<p>$U = 100 \text{ В};$ $r = 10 \text{ Ом};$ $x = 0.$</p> <p>Определите мощность, потребляемую в цепи.</p>	$P = 10 \text{ Вт}$	131
	$P = 100 \text{ Вт}$	43
	$P = 1000 \text{ Вт}$	231
	$P = 0$	241
<p>$U = 100 \text{ В};$ $I = 10 \text{ А};$ $\cos \varphi = 0,5.$</p> <p>Определите активную мощность.</p>	10 Вт	19
	100 Вт	120
	500 Вт	30
	1000 Вт	40

Продолжение карт. № 3.19

Определите полную мощность в условиях предыдущей задачи.	$S = 1000 \text{ В}\cdot\text{А}$	28
	$S = 500 \text{ В}\cdot\text{А}$	238
	$S = 100 \text{ В}\cdot\text{А}$	149
	$S = 10 \text{ В}\cdot\text{А}$	150
Определите реактивную мощность в условиях предыдущей задачи.	$Q = 500 \text{ В}\cdot\text{А}$	33
	$Q = 750 \text{ В}\cdot\text{А}$	143
	$Q = 100\sqrt{75} \text{ В}\cdot\text{А}$	253
	$Q = 10\sqrt{75} \text{ В}\cdot\text{А}$	157
$U = 100 \text{ В};$ $I = 1 \text{ А};$ $P = 50 \text{ Вт}.$ Определите $\cos \varphi$.	$\cos \varphi = 1$	168
	$\cos \varphi = 0,5$	57
	$\cos \varphi = 0$	267
	Для решения задачи недостаточно данных	331

3.20. Коэффициент мощности

Полная мощность источника S и активная мощность P , потребляемая электрической цепью, связаны соотношением

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

В этой формуле величину $\cos \varphi$ принято называть коэффициентом мощности. Коэффициент мощности имеет большое народнохозяйственное значение.

Предположим, что напряжение U источника электрической энергии и активная мощность потребителя P заданы. Тогда величина тока в цепи, определяемая выражением

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi},$$

будет зависеть только от коэффициента мощности. Чем меньше $\cos \varphi$, тем больший ток необходим для обеспечения

потребителя заданной активной мощностью. Обозначим сопротивление проводов линии электропередачи через $r_{\text{пр}}$ и на основании закона Джоуля — Ленца выразим тепловые потери энергии в линии:

$$\Delta P = I^2 r_{\text{пр}} = \frac{P^2 r_{\text{пр}}}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{K}{\cos^2 \varphi}.$$

В рассматриваемом случае K — постоянная величина. Следовательно, потери в линии электропередачи обратно пропорциональны квадрату коэффициента мощности: с уменьшением коэффициента мощности потери в линии быстро возрастают.

Таким образом, экономически невыгодно питать потребителей, работающих при низком $\cos \varphi$.

Цепи с низким коэффициентом мощности экономически нецелесообразны еще и по другой причине.

Расчет генераторов и трансформаторов ведется на полную мощность S . Именно этой мощностью определяются размеры, вес, количество потребных материалов и стоимость агрегатов.

Поскольку

$$S = \frac{P}{\cos \varphi},$$

то ясно, что расчетная мощность источника электрической энергии, обеспечивающего потребителя заданной активной мощностью, тем больше, чем меньше $\cos \varphi$.

Так, например, при $\cos \varphi = 1$ $S = P$, а при $\cos \varphi = 0,5$ $S = 2P$. Следовательно, при $\cos \varphi = 0,5$ генератор и трансформаторы, через которые питается потребитель, должны быть рассчитаны на мощность вдвое большую, чем при $\cos \varphi = 1$. Нетрудно представить себе, к какому огромному перерасходу дорогостоящих электротехнических материалов и трудовых затрат привело бы снижение коэффициента мощности в 2 раза. Пришлось бы, например, удвоить количество электростанций, обеспечивающих потребности народного хозяйства.

Приведенные примеры показывают, насколько важна борьба за повышение $\cos \varphi$ на каждом предприятии, у каждого потребителя, а следовательно, и в энергосистеме в целом.

Разработаны специальные методы, позволяющие повысить $\cos \varphi$ и разгрузить источники электрической энергии и линии электропередачи от реактивной мощности.

Карточка № 3.20 (155)
Коэффициент мощности

Активная мощность потребителя и напряжение на его зажимах постоянны. Как изменится потребляемый ток при уменьшении $\cos \varphi$ в 2 раза?	Увеличится в 2 раза	11
	Не изменится	22
	Уменьшится в 2 раза	133
	Увеличится в 4 раза	44
Активная мощность потребителя и напряжение на его зажимах постоянны. Как изменятся тепловые потери в линии электропередачи при увеличении $\cos \varphi$ в 2 раза?	Увеличатся в 2 раза	255
	Не изменятся	134
	Уменьшатся в 2 раза	214
	Увеличатся в 4 раза	87
Активная мощность потребителя $P = 100$ кВт. Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,5$. Определите расчетную мощность генератора, обеспечивающего питание потребителя.	50 кВт	110
	100 кВт	20
	200 кВт	32
	400 кВт	88
Расчетная мощность генератора 300 000 кВт. Определите активную мощность, отдаваемую генератором при полной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,5$.	150 000 кВт	321
	300 000 кВт	130
	600 000 кВт	240
	75 000 кВт	51
Какую активную мощность отдает при полной нагрузке рассмотренный выше генератор, если коэффициент мощности увеличится до 0,8?	375 000 кВт	4
	300 000 кВт	14
	240 000 кВт	104
	220 000 кВт	224

3.21. Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности

Чтобы потренироваться в применении введенных выше понятий и определений, рассмотрим некоторые частные случаи простых цепей переменного тока.

На рис. 3.39 изображена электрическая цепь, эквивалентная реальной катушке индуктивности. Такая катушка помимо индуктивности L обладает заметным активным сопротивлением r .

Полагая в общей формуле закона Ома для цепи переменного тока $x_C = 0$, получаем закон Ома для рассматриваемой цепи:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}.$$

Применяя закон Ома к каждому из участков, содержащих r или L (см. 3.14, 3.15), находим:

$$U_r = I \cdot r; U_L = I x_L.$$

Построение векторной диаграммы начнем с изображения вектора тока (рис. 3.40). При построении учитываем, что напряжение U_r совпадает с током I по фазе, а напряжение U_L опережает по фазе ток I на 90° . Вектор, изображающий напряжение на зажимах цепи, найдем на основании второго закона Кирхгофа

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L.$$

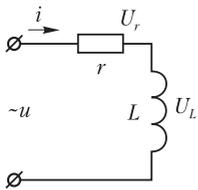


Рис. 3.39

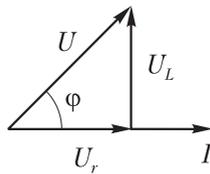


Рис. 3.40

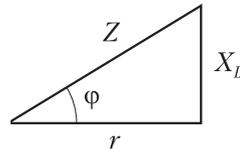


Рис. 3.41

Разделив стороны U , U_r , U_L треугольника напряжений на действующее значение тока, получим треугольник сопротивлений, изображенный на рис. 3.41.

Угол φ сдвига по фазе между током в цепи и напряжением на ее зажимах может быть определен из геометрического построения или найден по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r} = \frac{\omega L}{r}.$$

Нетрудно видеть, что угол φ всегда положителен и лежит в пределах $0 < \varphi < 90^\circ$. Таким образом, в цепи с реальной катушкой индуктивности напряжение опережает по фазе ток на угол φ , меньший 90° .

При этом мгновенные значения тока и приложенного к цепи напряжения могут быть записаны в следующем виде:

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Можно сказать также, что в цепи с реальной катушкой индуктивности ток отстает по фазе от напряжения на угол φ , меньший 90° :

$$u = U_m \sin \omega t;$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Графики изменения тока и напряжения с течением времени в первом случае изображены на рис. 3.42, а во втором — на рис. 3.43.

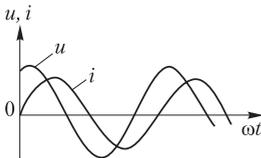


Рис. 3.42

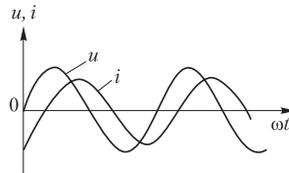


Рис. 3.43

Треугольник мощностей (рис. 3.44) подобен треугольникам напряжений и сопротивлений:

$$S = UI;$$

$$P = UI \cos \varphi;$$

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Реальная катушка индуктивности потребляет как реактивную мощность Q , так и активную мощность P . Катушки индуктивности находят широкое применение в электротехнике и радиотехнике как специальные приборы (дроссели). Кроме того, на электрических схемах замещения обмотки трансформаторов, реле, электрических машин и др. часто тоже рассматриваются как катушки индуктивности.

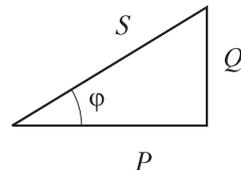
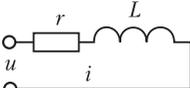
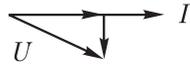
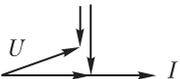
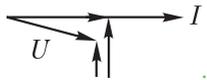
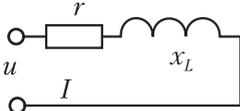
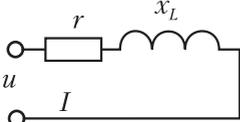


Рис. 3.44

Карточка № 3.21 (158)

Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности

 <p>Укажите векторную диаграмму, соответствующую этой цепи.</p>	   	32 141 252 64
<p>В предыдущем случае $U = 100$ В; $r = 8$ Ом; $x_L = 6$ Ом. Определите действующее значение тока в цепи.</p>	10 А 20 А 30 А 40 А	132 241 152 164
 <p>$r = x_L = 1$ Ом; $u = \sqrt{2} \sin \omega t$.</p> <p>Укажите выражение силы тока.</p>	$i = \sqrt{2} \sin \omega t$ $i = \sin 45^\circ$ $i = \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i = \sin(\omega t - 45^\circ)$	23 231 142 251
 <p>$r = x_L = 1$ Ом; $u = \sin \omega t$.</p> <p>Укажите выражение напряжения, приложенного к цепи.</p>	$u = \sin \omega t$ $u = \sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ)$ $u = \sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ)$ $u = \sqrt{2} \sin \omega t$	212 122 34 243

Продолжение карт. № 3.21

$P = 300$ Вт; $Q = 400$ В·А. Определите S .	400 Вт	56
	500 Вт	121
	600 Вт	143
	700 Вт	341

3.22. Последовательное соединение активного сопротивления и емкости

Рассматриваемая электрическая цепь изображена на рис. 3.45. Полагая в общей формуле закона Ома $x_L = 0$, получаем закон Ома для рассматриваемой цепи:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (-x_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

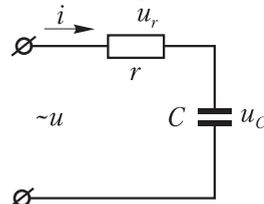


Рис. 3.45

Применяя закон Ома к каждому из участков, содержащих r или C (см. 3.14, 3.15), находим

$$U_r = I \cdot r; \quad U_C = I x_C = \frac{I}{\omega C}.$$

Построение векторной диаграммы начнем с изображения вектора тока I (рис. 3.46). При построении учитываем, что напряжение U_r совпадает с током I по фазе, а напряжение U_C отстает по фазе от тока I на 90° . Вектор, изображающий напряжение на зажимах цепи, найдем на основании второго закона Кирхгофа:

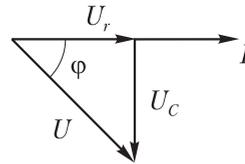


Рис. 3.46

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_C.$$

Разделив стороны U , U_r , U_C треугольника напряжений на действующее значение тока, получим треугольник сопротивлений, изображенный на рис. 3.47.

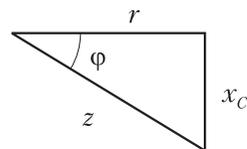


Рис. 3.47

Угол φ сдвига по фазе между током в цепи и напряжением на ее зажимах может быть определен из геометрического построения или найден по своему тангенсу

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{-x_C}{r} = -\frac{1}{\omega C \cdot r}.$$

Нетрудно видеть, что угол φ всегда отрицателен и лежит в пределах $0 > \varphi > -90^\circ$. Таким образом, при последовательном соединении активного сопротивления и емкости напряжение отстает от тока по фазе на угол, меньший 90° .

При этом мгновенные значения тока и приложенного к цепи напряжения могут быть записаны в следующем виде:

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$u = U_m \sin (\omega t - \varphi).$$

Графическое изображение этих величин представлено на рис. 3.48.

Можно сказать также, что при последовательном соединении активного сопротивления и емкости ток опережает по фазе напряжение на угол φ , меньший 90° :

$$u = U_m \sin \omega t;$$

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi).$$

Графики этого напряжения и тока изображены на рис. 3.49.

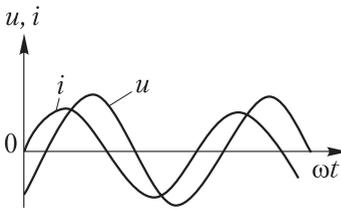


Рис. 3.48

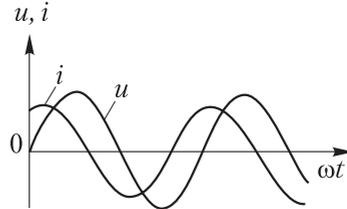


Рис. 3.49

Треугольник мощностей (рис. 3.50) подобен треугольникам напряжений и сопротивлений:

$$S = UI;$$

$$P = S \cos \varphi;$$

$$Q = S \sin \varphi.$$

Цепь, содержащая (последовательно соединенные активное сопротивление и емкость, потребляет как реактивную Q , так и активную P мощности.

Поскольку в рассматриваемом случае угол φ отрицателен, реактивной мощности следует приписать знак минус. Активная мощность всегда положительна, так как $\cos(-\varphi) = \cos\varphi$.

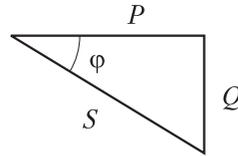


Рис. 3.50

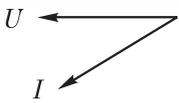
Таким образом, реактивная мощность, потребляемая катушкой индуктивности, и реактивная мощность, потребляемая конденсатором, имеют разные знаки. Если в цепи имеется конденсатор и катушка индуктивности, то суммарная реактивная мощность, потребляемая от источника электрической энергии, будет равна разности реактивных мощностей конденсатора и катушки. Если реактивные мощности конденсатора и катушки равны, цепь будет потреблять от источника питания только активную мощность.

Цепочки, содержащие последовательно соединенные активные сопротивления и емкости, находят широкое применение в электротехнике, радиотехнике, вычислительной технике (фильтры, электрические дифференцирующие устройства, интегрирующие устройства, схемы для отсчета интервалов времени и др.).

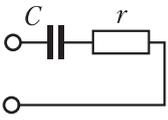
Реальные конденсаторы имеют очень малое активное сопротивление, и им обычно пренебрегают при расчетах. В некоторых случаях активное сопротивление конденсатора приходится учитывать, тогда конденсатор представляют рассмотренной выше схемой замещения (см. рис. 3.45).

Карточка № 3.22 (99)

Последовательное соединение активного сопротивления и емкости

 <p>Какая цепь характеризует- ся этой векторной диаграм- мой?</p>	Цепь, содержащая r, L	54
	Цепь, содержащая L	145
	Цепь, содержащая C	131
	Цепь, содержащая r, C	40

Продолжение карт. № 3.22

 <p>$x_C = 10 \text{ Ом};$ $r = 10 \text{ Ом}.$</p> <p>Найдите полное сопротивление и угол сдвига по фазе между током в этой цепи и напряжением на ее зажимах.</p>	$z = 10\sqrt{2} \text{ Ом}; \varphi = 90^\circ$	100
	$z = 10\sqrt{2} \text{ Ом}; \varphi = 45^\circ$	201
	$z = 10\sqrt{2} \text{ Ом}; \varphi = -45^\circ$	202
	Решение задачи невозможно, так как неизвестна частота приложенного напряжения	37
<p>К цепи, изображенной выше, приложено напряжение $u = 141 \sin \omega t$. Укажите выражение для тока в цепи.</p>	$i = 10 \sin \omega t$	73
	$i = 10 \sin (\omega t + 45^\circ)$	203
	$i = 141 \sin (\omega t + 45^\circ)$	65
	$i = 141 \sin (\omega t - 45^\circ)$	165
<p>В цепи, изображенной выше, протекает ток $i = 10 \sin \omega t$. Укажите выражение для напряжения, приложенного к цепи.</p>	$u = 141 \sin (\omega t - 45^\circ)$	12
	$u = 141 \sin (\omega t + 45^\circ)$	211
	$u = 100 \sin \omega t$	221
	$u = 100 \sin 45^\circ$	21
<p>К цепи, изображенной выше, приложено напряжение $U = 100 \text{ В}$ (действующее значение). Определите активную и реактивную мощности.</p>	500 Вт; 500 В·А	142
	1000 Вт; 1000 В·А	114
	500 Вт; 1000 Вт	14
	1000 В·А; 500 Вт	24

3.23. Цепь переменного тока с параллельным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости

В некоторых случаях реальные ветви электрических цепей целесообразно изображать на схемах замещения в виде параллельного соединения элементов r , L , C (рис. 3.51). Рассмотрим основные закономерности, характерные для такого соединения элементов.

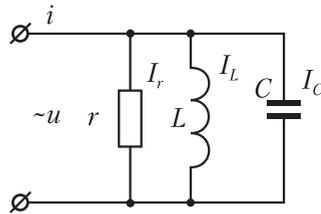


Рис. 3.51

Предварительно введем некоторые понятия: величину $g = \frac{1}{r}$ назовем активной проводимостью ветви (или цепи), величину $b_L = \frac{1}{x_L} = \frac{1}{\omega L}$ назовем индуктивной проводимостью, величину $b_C = \frac{1}{x_C} = \omega C$ назовем емкостной проводимостью, величину $b = b_L - b_C$ назовем реактивной проводимостью.

С введением этих обозначений закон Ома, рассмотренный нами для элементарных электрических цепей (3.14, 3.15, 3.16), может быть записан в другом виде:

$$I_r = \frac{U}{r} = Ug; I_L = \frac{U}{x_L} = Ub_L; I_C = \frac{U}{x_C} = Ub_C.$$

Исследование электрической цепи значительно облегчается, если использовать векторные диаграммы. Построение векторной диаграммы начнем с вектора напряжения, так как все элементы рассматриваемой электрической цепи находятся под одним и тем же напряжением. Ток I_r в ветви с активным сопротивлением совпадает по фазе с напряжением U , ток в ветви с индуктивностью I_L отстает по фазе от напряжения на 90° , ток I_C в ветви с емкостью опережает напряжение по фазе на 90° . Вектор результирующего тока I определяем на основании первого закона Кирхгофа

$$i = \dot{I}_r + \dot{I}_L + \dot{I}_C.$$

Векторная диаграмма для случая, когда $I_L > I_C$, представлена на рис. 3.52, а для случая $I_L < I_C$ — на рис. 3.53. На векторной диаграмме можно выделить треугольник токов со сторонами $I, I_r, I_L - I_C$.

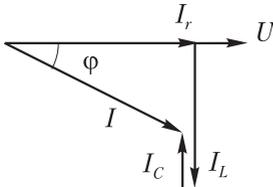


Рис. 3.52

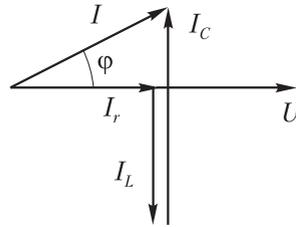


Рис. 3.53

Поделив все стороны треугольника токов на действующее значение напряжения, получим подобный треугольник со сторонами $\frac{I}{U}, \frac{I_r}{U}, \frac{I_L - I_C}{U}$.

Величину $\frac{I}{U}$, имеющую размерность проводимости, называют полной проводимостью и обозначают буквой y :

$$y = \frac{I}{U}; I = Uy.$$

Кроме того,

$$\frac{I_r}{U} = g; \frac{I_L}{U} = b_L; \frac{I_C}{U} = b_C.$$

Следовательно, стороны полученного треугольника равны y, g, b (рис. 3.54). Из треугольника проводимостей находим:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}.$$

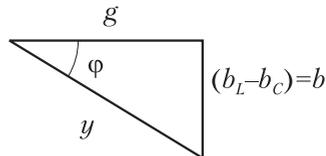


Рис. 3.54

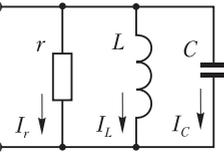
Кроме того, из рассматриваемого треугольника следует:

$$g = y \cos \varphi; \cos \varphi = \frac{g}{y};$$

$$b = y \sin \varphi; \sin \varphi = \frac{b}{y}.$$

Карточка № 3.23 (143)

Цепь переменного тока с параллельным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости

 <p>$r = x_L = x_C = 10 \text{ Ом}$</p>	$g = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0$	311
	$g = 0; B = 0$	222
	$g = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,1 \text{ Ом}^{-1}$	76
	$g = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$ $b = -0,1 \text{ Ом}^{-1}$	67
<p>К цепи, изображенной выше, приложено напряжение 100 В. Определите величину токов в ветвях. Условные направления токов указаны на схеме.</p>	$I_r = 10 \text{ А}; I_L = 10 \text{ А};$ $I_r = 10 \text{ А}$	221
	$I_r = 10 \text{ А}; I_L = I_C = 0$	78
	$I_r = I_L = I_C = 0$	87
<p>Определите полную проводимость цепи, изображенной выше, если</p> $g = 0,3 \text{ Ом}^{-1};$ $b_L = 0,2 \text{ Ом}^{-1};$ $b_C = 0,6 \text{ Ом}^{-1}.$	$y = 1,1 \text{ Ом}^{-1}$	322
	$y = 0,7 \text{ Ом}^{-1}$	123
	$y = 0,5 \text{ Ом}^{-1}$	312
	$y = 1 \text{ Ом}^{-1}$	91
<p>Определите угол сдвига по фазе между током в неразветвленной части и напряжением на зажимах цепи, изображенной выше, если $b = g = 0,5 \text{ Ом}^{-1}$.</p>	$\varphi = 0$	191
	$\varphi = 45^\circ$	127
	$\varphi = -45^\circ$	271
	$\varphi = 90^\circ$	94
<p>$\varphi = 30^\circ;$ $b = 0,5 \text{ Ом}^{-1}.$ Определите полную проводимость.</p>	$y = 0,5 \text{ Ом}^{-1}$	119
	$y = 1 \text{ Ом}^{-1}$	172
	$y = 2 \text{ Ом}^{-1}$	32
	$y = 0,25 \text{ Ом}^{-1}$	42

3.24. Схемы замещения электрической ветви цепи переменного тока

Реальный участок электрической цепи, содержащий последовательно соединенные активное сопротивление, катушку индуктивности и конденсатор, может быть представлен на схеме замещения в двух вариантах. В первом случае (рис. 3.55) он представляется в виде последовательного соединения двух элементов, один из которых обладает только активным, а другой — только реактивным сопротивлением. Во втором случае (рис. 3.56) — в виде параллельного соединения ветви с чисто активной проводимостью и ветви с реактивной проводимостью. Поскольку обе схемы замещают один и тот же реальный объект, они эквивалентны. Следовательно,

$$z = \frac{1}{y} \text{ или } y = \frac{1}{z}.$$

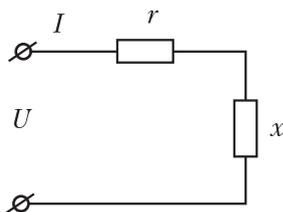


Рис. 3.55

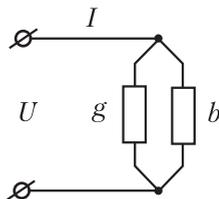


Рис. 3.56

Последнее условие и соотношения, вытекающие из треугольников сопротивлений и проводимостей, позволяют найти зависимости, при помощи которых осуществляется переход от первой схемы замещения ко второй и обратно.

Из треугольника проводимостей получаем:

$$g = y \cos \varphi;$$

$$b = y \sin \varphi.$$

С учетом условия эквивалентности эти равенства можно представить в таком виде:

$$g = \frac{1}{z} \cos \varphi;$$

$$b = \frac{1}{z} \sin \varphi.$$

Но из треугольника сопротивлений следует:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{z}.$$

После подстановки окончательно получаем:

$$g = \frac{r}{z^2}; \quad b = \frac{x}{z^2}.$$

или

$$g = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad b = \frac{x}{r^2 + x^2},$$

так как

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

Таким образом, мы получили формулы, позволяющие найти проводимости g и b эквивалентной схемы, если известны сопротивления r и x .

Аналогичные рассуждения приводят к зависимостям, выражающим r и x через известные g и b .

Из треугольника сопротивлений

$$r = z \cos \varphi; \quad x = z \sin \varphi.$$

Из треугольника проводимостей

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{y}.$$

Из условия эквивалентности

$$z = \frac{1}{y}.$$

После подстановок находим

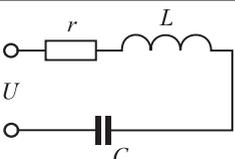
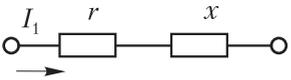
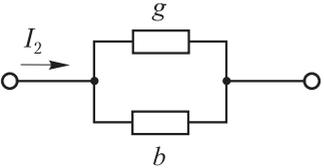
$$r = \frac{g}{y^2}; \quad x = \frac{b}{y^2}.$$

Учитывая, что $y = \sqrt{g^2 + b^2}$, выражения для r и x можно записать в виде:

$$r = \frac{g}{g^2 + b^2}; \quad x = \frac{b}{g^2 + b^2}.$$

Карточка № 3.24 (139)

Схемы замещения электрической ветви цепи переменного тока

 <p> $r = 3 \text{ Ом};$ $f = 50 \text{ Гц};$ $L = \frac{6}{314} \text{ Гн};$ $C = \frac{0,5}{314} \text{ Ф}.$ </p> <p>Определите x_L и x_C.</p>	$x_L = 6 \text{ Ом};$ $x_C = 0,5 \text{ Ом}$	79
	$x_L = 6 \text{ Ом};$ $x_C = 2 \text{ Ом}$	105
	$x_L = 10 \text{ Ом};$ $x_C = 2 \text{ Ом}$	115
	$x_L = 10 \text{ Ом};$ $x_C = 0,5 \text{ Ом}$	25
 <p>Найдите параметры r и x схемы замещения.</p>	$r = 3 \text{ Ом};$ $x = 6 \text{ Ом}$	35
	$r = 3 \text{ Ом};$ $x = 2 \text{ Ом}$	53
	$r = 5 \text{ Ом};$ $x = 2 \text{ Ом}$	106
	$r = 3 \text{ Ом};$ $x = 4 \text{ Ом}$	107
 <p>Найдите параметры b и g схемы замещения.</p>	$g = 0,08 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,12 \text{ Ом}^{-1}$	97
	$g = 0,12 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,16 \text{ Ом}^{-1}$	125
	$g = 0,16 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,2 \text{ Ом}^{-1}$	250
	$g = 0,2 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,24 \text{ Ом}^{-1}$	61
<p>Воспользовавшись формулой</p> $I_1 = \frac{U}{z},$ <p>определите ток I_1, если $U = 100 \text{ В}.$</p>	$I_1 = 5 \text{ А}$	132
	$I_1 = 10 \text{ А}$	312
	$I_1 = 15 \text{ А}$	231
	$I_1 = 20 \text{ А}$	251
<p>Воспользовавшись формулой</p> $I_2 = Uy,$ <p>определите ток $I_2.$</p>	$I_2 = 5 \text{ А}$	62
	$I_2 = 10 \text{ А}$	78
	$I_2 = 15 \text{ А}$	87
	$I_2 = 20 \text{ А}$	351

3.25. Последовательное и параллельное соединения потребителей в цепи переменного тока

При расчете цепей переменного тока возникает необходимость в последовательном преобразовании исходной схемы к схеме, для которой непосредственно применим закон Ома. Эта задача решается методом эквивалентной замены отдельных участков цепи.

На рис. 3.57 изображены два последовательно соединенных потребителя z_1 и z_2 и эквивалентный им потребитель z . Выразим составляющие r, x сопротивления z через r_1, r_2 и x_1, x_2 . На основании векторной диаграммы, изображенной на рис. 3.58, устанавливаем, что

$$U_r = U_{r_1} + U_{r_2}; \quad U_x = U_{x_1} + U_{x_2},$$

где U_r — падение напряжения на r ; U_{r_1} — падение напряжения на r_1 ; U_x — падение напряжения на сопротивлении x и т.д.

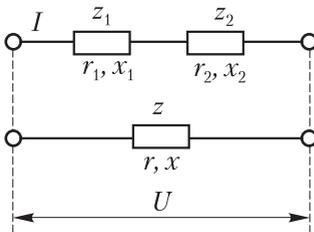


Рис. 3.57

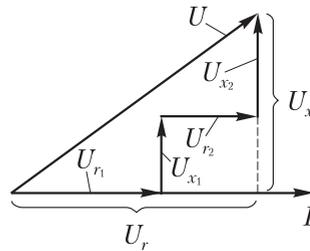


Рис. 3.58

Применяя закон Ома, находим:

$$Ir = Ir_1 + Ir_2; \quad Ix = Ix_1 + Ix_2,$$

откуда получаем

$$r = r_1 + r_2; \quad x = x_1 + x_2.$$

Рассуждения не изменятся, если рассматривать три, четыре, вообще n последовательно соединенных приемников. Следовательно,

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_n;$$

$$x = x_1 + x_2 + \dots + x_n;$$

На рис. 3.59 изображены два параллельно соединенных потребителя y_1 и y_2 и эквивалентный им потребитель y . Выразим составляющие g и b проводимости y через g_1, g_2 и b_1, b_2 . На основании векторной диаграммы, изображенной на рис. 3.60, устанавливаем, что

$$I_g = I_{g_1} + I_{g_2}; \quad I_b = I_{b_1} + I_{b_2}.$$

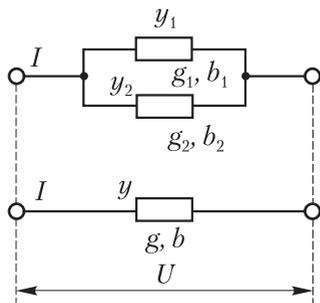


Рис. 3.59

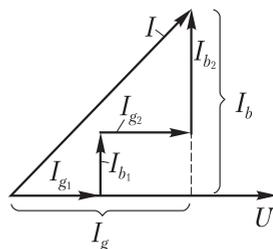


Рис. 3.60

Применяя закон Ома, записываем эти равенства в другом виде:

$$U_g = U_{g_1} + U_{g_2}; \quad U_b = U_{b_1} + U_{b_2},$$

откуда получаем

$$g = g_1 + g_2; \quad b = b_1 + b_2.$$

Рассуждения не изменятся, если рассмотреть три, четыре, вообще n параллельно соединенных приемников. Следовательно,

$$g = g_1 + g_2 + \dots + g_n;$$

$$b = b_1 + b_2 + \dots + b_n.$$

Таким образом, при эквивалентном преобразовании последовательно соединенных потребителей необходимо складывать их активные и отдельно реактивные сопротивления:

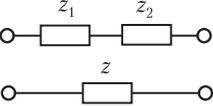
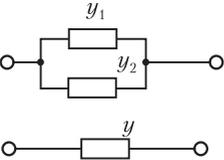
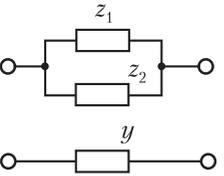
$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{(r_1 + r_2 + \dots + r_n)^2 + (x_1 + x_2 + \dots + x_n)^2}.$$

При эквивалентном преобразовании параллельно соединенных потребителей необходимо складывать отдельно их активные и отдельно реактивные проводимости:

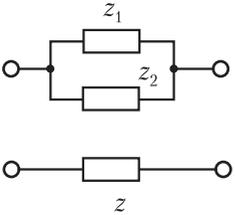
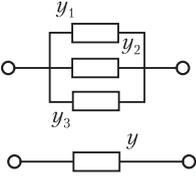
$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(g_1 + g_2 + \dots + g_n)^2 + (b_1 + b_2 + \dots + b_n)^2}.$$

Карточка № 3.25 (146)

Последовательное и параллельное соединения потребителей в цепи переменного тока

 <p> $r_1 = 5 \text{ Ом};$ $x_1 = 3 \text{ Ом};$ $r_2 = 1 \text{ Ом};$ $x_2 = -11 \text{ Ом}.$ </p> <p>Схемы эквивалентны. Определите z.</p>	2 Ом	317
	14 Ом	318
	10 Ом	319
	6 Ом	177
 <p> $g_1 = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$ $b_1 = 0,5 \text{ Ом}^{-1};$ </p> <p> $g_2 = 0,2 \text{ Ом}^{-1};$ $b_2 = -0,1 \text{ Ом}^{-1}.$ </p> <p>Схемы эквивалентны. Определите Y.</p>	0,1 Ом ⁻¹	173
	0,2 Ом ⁻¹	138
	0,3 Ом ⁻¹	391
	0,5 Ом ⁻¹	220
 <p> $x_1 = 3 \text{ Ом};$ $r_1 = 4 \text{ Ом};$ $x_2 = 6 \text{ Ом};$ $r_2 = 8 \text{ Ом}.$ </p> <p>Схемы эквивалентны. Определите активную g и реактивную b составляющие полной проводимости y.</p>	$g = 0,9 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,12 \text{ Ом}^{-1}$	123
	$g = 1,6 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 1,2 \text{ Ом}^{-1}$	371
	$g = 0,24 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,18 \text{ Ом}^{-1}$	232
	$g = 3,8 \text{ Ом}^{-1};$ $b = 0,5 \text{ Ом}^{-1}$	350

Продолжение карт. № 3.25

 <p>Схемы эквивалентны. При условиях предыдущей задачи определите z.</p>	$10/3 \text{ Ом}$	25	
	10 Ом	152	
	$5/3 \text{ Ом}$	215	
	$8/3 \text{ Ом}$	214	
 <p>Схемы эквивалентны. Определите y.</p>	$g_1 = g_2 = g_3 =$ $= 0,1 \text{ Ом}^{-1};$	$y = 0,5 \text{ Ом}^{-1}$	150
	$b_1 = b_2 = 0,3 \text{ Ом}^{-1};$	$y = 0,4 \text{ Ом}^{-1}$	51
	$b_3 = -0,2 \text{ Ом}^{-1}.$	$y = 0,3 \text{ Ом}^{-1}$	152
		$y = 0,2 \text{ Ом}^{-1}$	54

3.26. Расчет цепи переменного тока методом сопротивлений и проводимостей

На рис. 3.61 изображена электрическая цепь со смешанным соединением трех приемников электрической энергии. Известны активные и реактивные сопротивления ветвей $r_1, x_1, r_2, x_2, r_3, x_3$. Известно приложенное к цепи напряжение U . Требуется определить ток I в неразветвленной части цепи и коэффициент мощности.

Решение задачи производим в следующей последовательности.

1. Определяем полные сопротивления ветвей:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}; z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}; z_3 = \sqrt{r_3^2 + x_3^2}.$$

2. Определяем активные и реактивные проводимости параллельных ветвей (составляющие полных проводимостей y_1 и y_2 , представленных на рис. 3.62, а):

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2}; \quad b_2 = \frac{x_2}{z_2^2};$$

$$g_3 = \frac{r_3}{z_3^2}; \quad b_3 = \frac{x_3}{z_3^2}.$$

3. Определяем полную проводимость участка параллельного соединения ветвей (рис. 3.62, б):

$$g_{23} = g_2 + g_3; \quad b_{23} = b_2 + b_3;$$

$$y_{23} = \sqrt{g_{23}^2 + b_{23}^2}.$$

4. Определяем полное сопротивление участка параллельного соединения ветвей (рис. 3.62, в):

$$z_{23} = \frac{1}{y_{23}}.$$

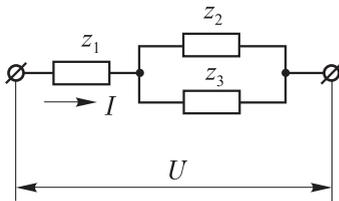


Рис. 3.61

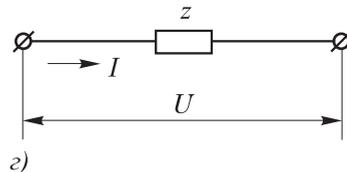
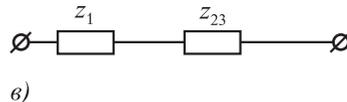
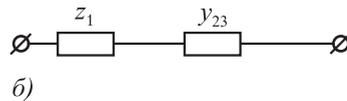
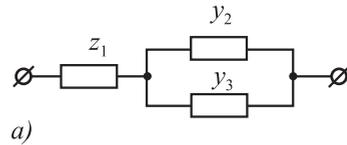


Рис. 3.62

5. Определяем активную и реактивную составляющие сопротивления z_{23} :

$$r_{23} = \frac{g_{23}}{y_{23}^2}; x_{23} = \frac{b_{23}}{y_{23}}.$$

Проверка:

$$z_{23} = \sqrt{r_{23}^2 + x_{23}^2}.$$

6. Определяем активную и реактивную составляющие сопротивления z (рис. 3.62, z):

$$r = r_1 + r_{23}; \quad x = x_1 + x_{23};$$

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

7. Находим ответы на вопросы, поставленные в условии задачи:

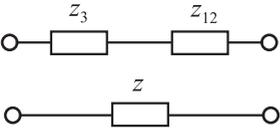
$$I = \frac{U}{z}; \quad \cos \varphi = \frac{r}{z}.$$

Карточка № 3.26 (196)

Расчет цепи переменного тока методом сопротивлений и проводимостей

	$x_1 = 3 \text{ Ом};$ $r_1 = 4 \text{ Ом};$ $x_2 = 6 \text{ Ом};$ $r_2 = 8 \text{ Ом}.$	$g_1 = 0,4; g_2 = 0,4;$ $b_1 = 0,2; b_2 = 0,2$	8
<p>Определите g_1, g_2, b_1, b_2 (Ом^{-1}).</p>		$g_1 = 0,6; g_2 = 0,6;$ $b_1 = b_2 = 0,4$	28
		$g_1 = 0,16; g_2 = 0,08;$ $b_1 = 0,12; b_2 = 0,06$	130
		$g_1 = 0,16; g_2 = 0,24;$ $b_1 = 0,12; b_2 = 0,18$	30
		$g_{12} = 0,12; b_{12} = 0,09;$ $y_{12} = 0,15$	213
<p>Эта схема эквивалентна предыдущей. Определите g_{12}, b_{12}, y_{12} (Ом^{-1}).</p>		$g_{12} = 0,24;$ $b_{12} = 0,18; y_{12} = 0,3$	31
		$g_{12} = 0,3; b_{12} = 0,4;$ $y_{12} = 0,5$	82
		$r_{12} = 4; x_{12} = 4$	108
<p>Эта схема эквивалентна предыдущей. Определите r_{12}, x_{12} (Ом).</p>		$r_{12} = 10/3; x_{12} = 3$	98
		$r_{12} = 8/3; x_{12} = 2$	158

Продолжение карт. № 3.26

 <p> $r_3 = 1/3 \text{ Ом};$ $x_3 = 2 \text{ Ом}.$ Схемы эквивалентны. Определите z (Ом). </p>	$z = 2$	85
	$z = 3$	189
	$z = 4$	97
	$z = 5$	225
<p> $U = 100 \text{ В}.$ Определите $\cos \varphi$ и ток I в неразветвленной части исходной схемы. </p>	$\cos \varphi = 3/5; I = 20 \text{ А}$	152
	$\cos \varphi = 4/5; I = 20 \text{ А}$	135
	$\cos \varphi = 3/4; I = 30 \text{ А}$	312
	$\cos \varphi = 1/2; I = 30 \text{ А}$	77

ГЛАВА 4

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

4.1. Резонанс напряжений. Физическая сущность явления

Прежде чем обратиться к резонансным явлениям, возникающим в электрических цепях, рассмотрим качественную картину механического резонанса, с которым каждый из нас неоднократно встречался в повседневной практике.

Представим себе упругую пластину, один конец которой закреплен неподвижно (рис. 4.1). На пластину действует постоянная по направлению сила F . Из опыта хорошо известно: чем больше сила F , тем больше угол отклонения пластины от положения равновесия (рис. 4.1, а).

Однако возможен и другой случай. Пусть на пластину действует постоянная по величине, но периодически меняющая свое направление сила.

Опыт показывает, что такая сила также способна вызывать различные по величине отклонения пластины. При этом угол отклонения α оказывается в сложной функциональной зависимости от частоты f , с которой изменяется направление приложения силы F . При некоторой частоте f_2 угол отклонения пластины достигает максимального значения α_2 (рис. 4.1, б), которое может значительно превышать значе-

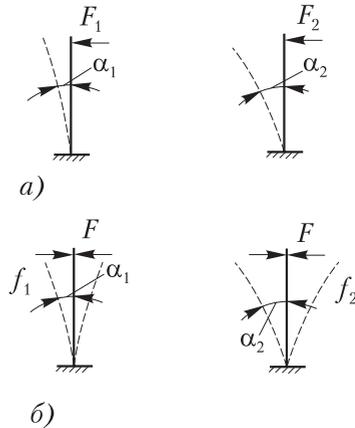


Рис. 4.1

ние угла отклонения, вызываемого такой же по величине, но неизменной по направлению силой.

Режим колебаний пластины, при котором угол отклонения максимален, принято называть резонансным режимом. Таким образом, для явления резонанса характерна зависимость амплитуды колебаний не только от величины действующей силы, но и от частоты изменения направления этой силы.

Это происходит потому, что при некоторой частоте сила начинает действовать согласованно, в такт с собственными колебаниями системы.

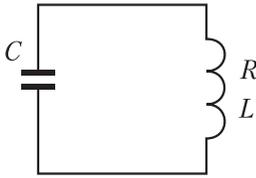


Рис. 4.2

Аналогичные процессы возникают в колебательном контуре (рис. 4.2). Если зарядить конденсатор C до некоторого напряжения и замкнуть цепь, то энергия электрического поля конденсатора перейдет в энергию магнитного поля катушки; это состояние будет неустойчивым, и энергия магнитного поля катушки

будет преобразовываться в энергию электрического поля конденсатора. Возникают колебания энергии, тока и напряжения в цепи. При отсутствии активного сопротивления R колебания будут незатухающими. В реальных условиях вследствие тепловых потерь в сопротивлении R колебания энергии затухнут.

Угловая частота ω_0 собственных незатухающих колебаний контура определяется его параметрами L и C :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Если в такой контур ввести синусоидальную электродвижущую силу $e = E_m \sin \omega t$ (рис. 4.3), угловая частота которой равна угловой частоте собственных незатухающих колебаний

$$\omega = \omega_0,$$

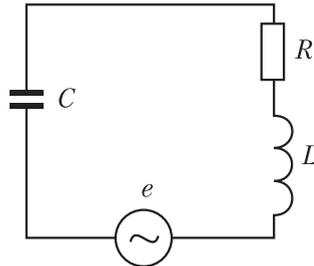


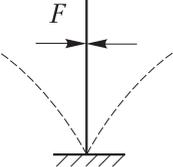
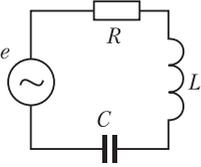
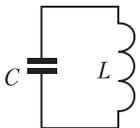
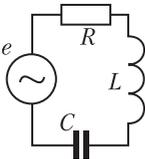
Рис. 4.3

то в цепи возникают резонансные явления, сопровождаемые увеличением количества энергии, которая колеблется между катушкой и конденсатором. При этом ток в цепи достигает максимального значения, а на-

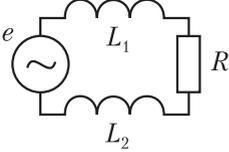
пряжения на конденсаторе и катушке индуктивности могут при некоторых условиях значительно превышать электродвижущую силу источника электрической энергии.

Карточка № 4.1 (133)

Резонанс напряжений. Физическая сущность явления

 <p>На упругую пластину действует периодическая сила F. Чем определяется максимальный угол отклонения пластины?</p>	Частотой приложения силы F	125
	Амплитудой силы F	126
	Амплитудой силы F и частотой ее приложения	127
 <p>R, L и C — постоянны. От чего зависит амплитуда тока в цепи?</p>	От частоты ЭДС	31
	От амплитуды ЭДС	32
	От частоты и амплитуды ЭДС	33
 <p>$L = 1$ Гн; $C = 1$ мкФ.</p> <p>Определите угловую частоту собственных незатухающих колебаний в контуре.</p>	1 с^{-1}	237
	1000 с^{-1}	238
	10^6 с^{-1}	239
	10^{-3} с^{-1}	240
 <p>$L = 1$ Гн; $C = 1$ мкФ.</p> <p>Выполняются ли условия резонанса напряжений при: а) $e = 100 \sin 1000t$; б) $e = 1000 \sin 1000t$?</p>	а) Да; б) нет	117
	а) Да; б) да	118
	а) Нет; б) да	119
	а) Нет; б) нет	120

Продолжение карт. № 4.1

 <p>Возможен ли в этой цепи режим резонанса?</p>	Да	314
	Нет	315

4.2. Резонанс напряжений. Основные определения

Резонансом напряжений назовем явление возрастания амплитуды тока и напряжения на участках цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивности и емкости, при приближении частоты действующей в цепи ЭДС, к некоторой определенной (резонансной) частоте.

Резонанс напряжений возникает, если частота приложенного к цепи напряжения (ЭДС) равна частоте собственных незатухающих колебаний энергии в цепи:

$$\omega = \omega_0,$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Используя это условие, найдем емкостное и индуктивное сопротивления контура, изображенного на рис. 4.4 при резонансе напряжений.

В общем случае

$$x_C = \frac{1}{\omega C}; \quad x_L = \omega L.$$

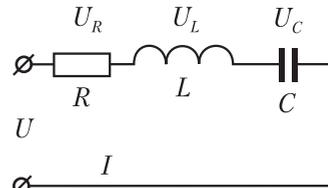


Рис. 4.4

При резонансе напряжений $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, следовательно,

$$x_C = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{LC}} C} = \sqrt{\frac{L}{C}};$$

$$x_L = \omega_0 L = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Таким образом, при резонансе напряжений

$$x_C = x_L$$

или

$$\frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L.$$

Следовательно, реактивное сопротивление x рассматриваемой цепи при резонансе равно нулю:

$$x = x_L - x_C = 0.$$

Далее, применяя закон Ома, находим

$$U_C = Ix_C; U_L = Ix_L,$$

откуда устанавливаем, что при резонансе реактивные напряжения по величине равны

$$U_C = U_L.$$

Векторная диаграмма цепи при резонансе напряжений изображена на рис. 4.5.

Напряжение U_R падающее на сопротивлении R , совпадает по фазе с током I . Вектор напряжения U_L повернут относительно вектора тока I на 90° против часовой стрелки, вектор U_C — на 90° по часовой стрелке.

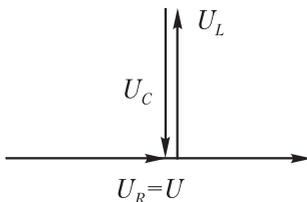


Рис. 4.5

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U}_R.$$

Напряжение U , приложенное к цепи, равно падению напряжения на активном сопротивлении контура U_R . Реактивные напряжения U_L и U_C взаимно компенсируются.

Непосредственно из векторной диаграммы очевидно, что ток i и напряжение u , приложенное к цепи, при резонансе совпадают по фазе.

Тот же факт можно установить и аналитически:

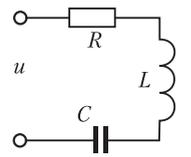
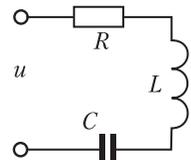
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = 0;$$

$$\varphi = 0.$$

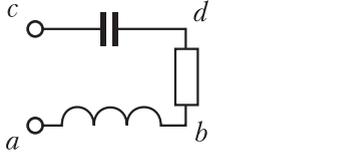
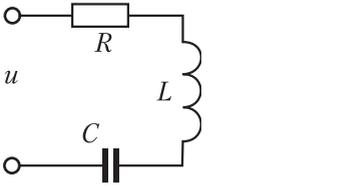
На этом основании резонанс напряжений определяют как такое явление в электрической цепи, содержащей последовательно соединенные конденсаторы и катушки, при котором разность фаз напряжения на зажимах цепи и тока на входе цепи равна нулю.

Карточка № 4.2 (196)

Резонанс напряжений. Основные определения

 <p>К цепи приложено напряжение $u = 10 \sin 1000t$. Выполняется ли условие резонанса?</p>	$L = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$ $C = 100 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$	Да	319
		Нет	320
		Для ответа на вопрос недостаточно данных	321
 <p>Укажите напряжение, при котором в цепи возникает резонанс.</p>	$L = 0,001 \text{ Гн}$ $C = 10 \text{ мкФ}$	$u = 10 \sin 1000t$	260
		$u = 10 \sin (10000t + 90^\circ)$	261
		$u = 100 \sin 100t$	262
		$u = \sin 10t$	263
$L = 0,01 \text{ Гн};$ $C = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}.$ Найдите x_L и x_C при резонансе напряжений.		Задача не определена, так как неизвестна частота ЭДС, действующей в цепи	79
		$x_L = 100 \text{ Ом};$ $x_C = 100 \text{ Ом}$	80
		$x_L = 10 \text{ Ом};$ $x_C = 1000 \text{ Ом}$	81
		$x_L = 10 \text{ Ом};$ $x_C = 10 \text{ Ом}$	82

Продолжение карт. № 4.1

 <p>При резонансе напряжение между точками ab равно 100 В. Чему равно напряжение между точками cd?</p>	10 В	206
	100 В	207
	200 В	208
	Задача не определена, так как неизвестно сопротивление конденсатора	209
 <p>Чему равен сдвиг по фазе между током i и напряжением u при резонансе?</p>	0	129
	90°	130
	180°	131
	-90°	132

4.3. Волновое сопротивление и добротность контура

При резонансе, как это было показано в предыдущем параграфе,

$$x_L = x_C = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Эту величину, зависящую только от параметров контура L и C , принято называть волновым сопротивлением контура. Ее обозначают буквой ρ :

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

На основании закона Ома для контура, изображенного на рис. 4.4, можно написать:

$$U_R = I \cdot R;$$

$$U_L = Ix_L;$$

$$U_C = Ix_C.$$

При резонансе напряжений (рис. 4.5)

$$U_R = U = IR;$$

$$U_L = U_C = I\rho.$$

Найдем отношение напряжения на конденсаторе (или индуктивности) к напряжению, приложенному к цепи:

$$\frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = \frac{I\rho}{IR} = \frac{\rho}{R} = Q.$$

Это отношение называют добротностью контура Q . Оно показывает, во сколько раз напряжение на конденсаторе при резонансе превышает приложенное напряжение.

Чем больше волновое сопротивление контура и меньше его активное сопротивление, тем выше добротность контура, тем лучше его избирательные свойства. Величину, обратную добротности, называют затуханием контура d :

$$d = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\rho}.$$

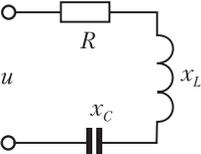
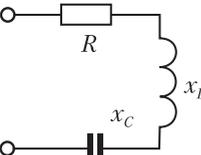
Чем меньше активное сопротивление контура, тем меньше его затухание. В идеальном контуре (при $R = 0$) затухание отсутствует. В таком контуре свободные колебания продолжались бы неограниченно долго.

В контуре, у которого $R \neq 0$ и $d \neq 0$, незатухающие колебания возникают только при наличии источника энергии, компенсирующего тепловые потери. Количество энергии, которой обмениваются катушка и конденсатор, зависит от частоты источника питания и достигает максимума при резонансной частоте. При этом суммарная энергия, запасенная в магнитном поле катушки и электрическом поле конденсатора, с течением времени не изменяется.

Таким образом, после того, как в цепи установится режим резонанса напряжений, катушка и конденсатор обмениваются постоянным количеством энергии, а источник покрывает потери в контуре.

Карточка № 4.3 (202)

Волновое сопротивление и добротность контура

 <p>При резонансе сопротивление конденсатора равно 20 Ом. Определите волновое сопротивление цепи.</p>	10 Ом	153
	20 Ом	152
	40 Ом	251
	Для решения задачи недостаточно данных	50
 <p>Чему равно волновое сопротивление цепи?</p>	Индуктивному сопротивлению цепи	172
	Емкостному сопротивлению цепи	73
	Индуктивному или емкостному сопротивлению цепи при резонансе	74
	Активному сопротивлению цепи	275
<p>$L = 0,1$ Гн; $C = 10$ мкФ. Найдите волновое сопротивление цепи.</p>	10 Ом	120
	100 Ом	121
	1000 Ом	22
	10000 Ом	23
<p>Волновое сопротивление цепи 20 Ом. При резонансе напряжений ток в контуре равен 10 А. Определите напряжение на конденсаторе.</p>	20 В	243
	200 В	144
	40 В	345
	Для решения задачи недостаточно данных	146
<p>Добротность цепи $Q = 100$. При резонансе измерено напряжение на конденсаторе $U_C = 1$ В. Определите приложенное к цепи напряжение.</p>	Задача не определена	208
	100 В	109
	1 В	210
	0,01 В	111

4.4. Частотные характеристики контура

Мы установили, что при резонансе угловая частота ω подключенного к контуру источника напряжения должна равняться частоте собственных незатухающих колебаний контура ω_0 :

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Если частота источника напряжения задана, то для получения резонанса нужно изменять ω_0 , изменяя параметры контура L и C . Наоборот, если параметры контура заданы, режим резонанса может быть получен за счет изменения частоты источника напряжения. Рассмотрим, как влияет изменение частоты на процессы в колебательном контуре.

При изменении частоты приложенного напряжения меняются индуктивное, емкостное и реактивное сопротивления контура:

$$x_L = \omega L; \quad x_C = \frac{1}{\omega C}; \quad x = x_L - x_C.$$

На рис. 4.6 эти зависимости представлены в виде графиков. Их называют частотными характеристиками цепи. С увеличением частоты индуктивное сопротивление контура x_L линейно возрастает, а емкостное сопротивление x_C изменяется по закону гиперболы. В режиме резонанса, соответствующем $\omega = \omega_0$, эти сопротивления равны друг другу, а реактивное сопротивление цепи равно нулю. Из графика очевидно, что в интервале частот $0 < \omega < \omega_0$ емкостное сопротивление цепи больше ее индуктивного сопротивления, реактивное сопротивление цепи x отрицательно и цепь в целом имеет емкостный характер. При этом ток опережает по фазе напряжение, приложенное к цепи.

В интервале частот $\omega < \omega_0 < \infty$ цепь имеет индуктивный характер, ток отстает от напряжения по фазе.

При изменении частоты происходит изменение тока в цепи и напряжения на ее участках. На рис. 4.7 приведены

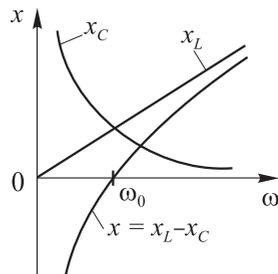


Рис. 4.6

частотные характеристики, представляющие зависимость тока в цепи

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

и напряжений на индуктивности и емкости от частоты. Эти кривые называют также резонансными характеристиками контура.

При $\omega = \omega_0$ ток в цепи достигает максимума. При $\omega = 0$ все приложенное к цепи напряжение падает на конденсаторе: $U_C = U$; $U_L = 0$. При $\omega = \infty$ все приложенное напряжение падает на индуктивности: $U_L = U$; $U_C = 0$. Напряжение U_C достигает максимума при $\omega = \omega_C$; напряжение U_L достигает максимума при $\omega = \omega_L$. Величины ω_C и ω_L определяются из условий:

$$\frac{dU_C}{d\omega} = 0; \quad \frac{dU_L}{d\omega} = 0.$$

Можно доказать, что чем меньше активное сопротивление цепи R , тем меньше различаются ω_L и ω_C . При $R \approx 0$ имеют место равенства

$$\omega_C \approx \omega_0 \approx \omega_L.$$

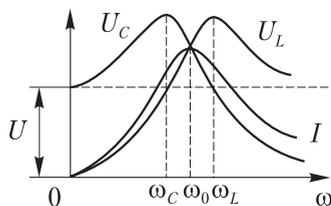


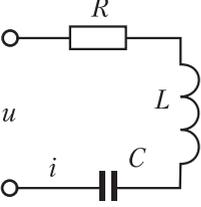
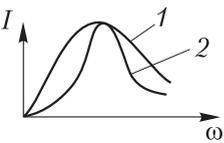
Рис. 4.7

Карточка № 4.4 (166)

Частотные характеристики контура

Каким образом можно получить режим резонанса напряжений? (Укажите неверный ответ)	Изменяя L при постоянных C и ω	11
	Изменяя C при постоянных L и ω	12
	Изменяя ω при постоянных L и C	13
	Изменяя R при постоянных L и C	14

Продолжение карт. № 4.4

<p>Частота питающего напряжения увеличивается. Как изменяются:</p> <p>а) емкостное сопротивление контура;</p> <p>б) индуктивное сопротивление?</p>	а) Увеличивается; б) увеличивается	21
	а) Увеличивается; б) уменьшается	22
	а) Уменьшается; б) увеличивается	23
	а) Уменьшается; б) уменьшается	24
<p>Как изменяется полное сопротивление цепи с последовательно соединенными R, L, C при увеличении частоты напряжения питания от нуля до бесконечности?</p>	Уменьшается	41
	Увеличивается	42
	Сначала уменьшается, потом увеличивается	43
	Сначала увеличивается, потом уменьшается	44
 <p>Как изменяется ток в цепи при $x_L > x_C$?</p>	Опережает по фазе приложенное напряжение	24
	Отстает по фазе от приложенного напряжения	25
 <p>Приведены резонансные кривые двух контуров. У какого контура добротность выше?</p>	Задача не определена	58
	Добротность одинакова	59
	У первого	60
	У второго	61

4.5. Резонанс токов. Резонансная частота

Резонанс токов определяют как такое явление в электрической цепи, содержащей параллельно соединенные конденсатор C и катушку L , при котором разность фаз напряжения на зажимах и тока на входе цепи равна нулю.

На рис. 4.8 изображены параллельно соединенные катушка и конденсатор, а на рис. 4.9 представлена векторная диаграмма этой цепи. Здесь обозначены:

I_{1a} — активная составляющая тока I_1 , протекающего через катушку;

I_{1p} — реактивная составляющая тока I_1 ;

I_{2a} — активная составляющая тока I_2 , протекающего через конденсатор;

I_{2p} — реактивная составляющая тока I_2 .

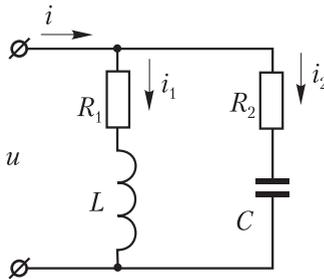


Рис. 4.8

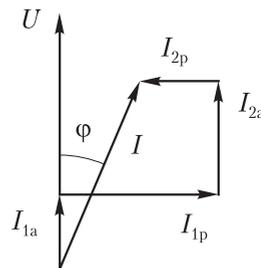


Рис. 4.9

Из векторной диаграммы очевидно, что $\varphi = 0$, когда $I_{1p} = I_{2p}$.

Но I_{1p} равно произведению реактивной проводимости b_1 ветви с катушкой на напряжение, приложенное к ветви (см. 3.23):

$$I_{1p} = Ub_1.$$

Аналогично

$$I_{2p} = Ub_2.$$

Таким образом, условие резонанса токов получает вид

$$Ub_1 = Ub_2 \text{ или } b_1 = b_2.$$

Выражая реактивные проводимости через параметры ветвей, находим

$$\frac{\omega_0 L}{R_1^2 + (\omega_0 L)^2} = \frac{\frac{1}{\omega_0 C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}.$$

Это уравнение позволяет определить резонансную частоту:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_1^2 - \frac{L}{C}}{R_2^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_1^2 - \rho^2}{R_2^2 - \rho^2}}.$$

При условии, что $R_1 \ll \rho$ и $R_2 \ll \rho$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ — волновое сопротивление контура, резонансная частота

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

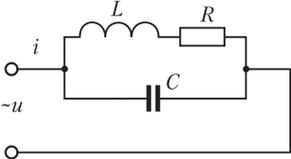
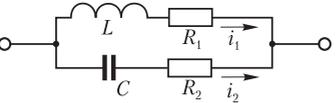
Если $R_1 \ll \omega_0 L$ и $R_2 \ll \frac{1}{\omega_0 C}$, то выражения для реактивных проводимостей параллельных ветвей упрощаются:

$$b_1 \approx \frac{1}{\omega_0 L} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot L} = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{1}{\rho};$$

$$b_2 \approx \omega_0 C = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot C = \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{1}{\rho}.$$

Карточка 4.5 (229)

Резонанс токов. Резонансная частота

 <p>Возможен ли электрический резонанс в изображенной электрической цепи?</p>	Электрический резонанс невозможен	116
	Возможен резонанс токов	217
	Возможен резонанс напряжений	148
 $z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2};$ $z_2 = \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$ <p>Укажите условие резонанса токов.</p>	$\omega L = \frac{1}{\omega C}$	14
	$I_1 = I_2$	15
	$\frac{x_L}{z_1^2} = \frac{x_C}{z_2^2}$	16
	$\dot{I}_1 = \dot{I}_2$	17
<p>$R = R_1 = R_2;$ $L = 0,01 \text{ Гн};$ $C = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}.$ Определите резонансную частоту.</p>	$\omega_0 = 10^8 \text{ с}^{-1}$	80
	$\omega_0 = 10^4 \text{ с}^{-1}$	81
	$\omega_0 = 10^2 \text{ с}^{-1}$	82
	Задача не определена, так как неизвестна величина активного сопротивления	83

Продолжение карт. № 4.5

$R_1^2 = 500 \text{ Ом};$ $R_2^2 = 200 \text{ Ом};$ $L = 0,01 \text{ Гн};$ $C = 1 \text{ мкФ}.$ Определите резонансную частоту.	$\omega_0 = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$	244
	$\omega_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	145
	$\omega_0 = 10^2 \text{ с}^{-1}$	46
	$\omega_0 = 10^6 \text{ с}^{-1}$	47
$R_1 = 1 \text{ Ом}; R_2 = 0,1 \text{ Ом};$ $L = 0,01 \text{ Гн};$ $C = 1 \text{ мкФ}.$ Определите резонансную частоту.	$\omega_0 \approx 10^8 \text{ с}^{-1}$	69
	$\omega_0 \approx 10^4 \text{ с}^{-1}$	70
	$\omega_0 \approx 10^2 \text{ с}^{-1}$	71

4.6. Резонанс токов в идеальном контуре

Под идеальным будем понимать такой контур, у которого активные сопротивления ветвей r_1 и r_2 исчезающе малы.

В этом случае при резонансе справедливы следующие соотношения:

$$I_1 = Ub_1 \approx \frac{U}{\omega_0 L} = \frac{U}{\rho};$$

$$I_2 = Ub_2 \approx U \omega_0 C = \frac{U}{\rho}.$$

Выражение для активной проводимости цепи также упрощается. Действительно:

$$g_1 = \frac{r_1}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2} \approx \frac{r_1}{(\omega_0 L)^2} = \frac{r_1}{\rho^2};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} \approx \frac{r_2}{\left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} = \frac{r_2}{\rho^2};$$

$$g = g_1 + g_2 \approx \frac{r_1 + r_2}{\rho^2}.$$

Полная проводимость цепи

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = g,$$

так как

$$b = b_1 - b_2 = 0.$$

Следовательно, при резонансе ток в неразветвленной части цепи

$$I = U \cdot y = U \frac{r_1 + r_2}{\rho^2}.$$

Найдем отношение

$$\frac{I_1}{I} \approx \frac{I_2}{I} \approx \frac{\rho}{r_1 + r_2}.$$

Таким образом, при резонансе ток в каждой из параллельных ветвей во столько раз больше тока в неразветвленной части цепи, во сколько раз волновое сопротивление контура больше суммы активных сопротивлений параллельных ветвей.

Резонанс токов можно получить, изменяя параметры контура L или C при постоянной частоте напряжения на зажимах цепи или изменяя частоту напряжения при постоянных L и C .

При изменении частоты приложенного напряжения меняются проводимости ветвей и токи в ветвях, а также проводимость всей цепи и ток в неразветвленной части цепи.

Рассмотрим зависимость тока от частоты в случае, когда активными сопротивлениями ветвей можно пренебречь ($r_1 = r_2 = 0$):

$$I_1 = Ub_1 = \frac{U}{\omega L};$$

$$I_2 = Ub_2 = U\omega C;$$

$$I = I_1 - I_2.$$

На рис. 4.10 эти зависимости изображены графически. При условии, что действующее значение напряжения постоянно $U = \text{const}$, $I_1 = f_1(\omega)$ — гипербола, $I_2 = f_2(\omega)$ — прямая, проходящая через начало координат. При резонансной частоте ω_0 ток в неразветвленной части цепи равен нулю. Соответствен-

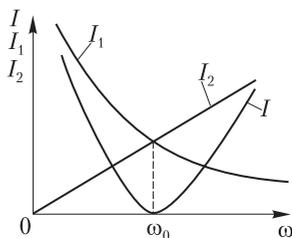


Рис. 4.10

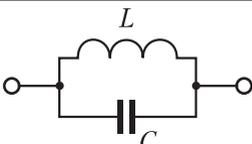
но проводимость всей цепи равна нулю, а сопротивление — бесконечно велико.

Рассмотренные зависимости соответствуют идеализированным условиям. В реальных условиях полное сопротивление цепи при всех частотах ограничено, а полная проводимость ни при какой частоте не достигает нуля.

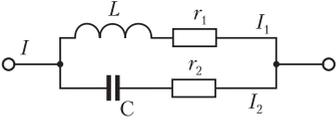
Действующее значение тока в неразветвленной части цепи при резонансной частоте также не равно нулю в реальном контуре.

Карточка № 4.6 (295)

Резонанс токов в идеальном контуре

Формула $\omega_0 \equiv \frac{1}{\sqrt{LC}}$ справедлива при условии, что	активные сопротивления ветвей r_1 и r_2 малы	65
	$r_1 = r_2$	66
	$r_1 \ll \omega_0 L; r_2 \ll \frac{1}{\omega_0 C}$	67
 Укажите условие резонанса токов в изображенной цепи.	$\frac{1}{\omega L} = \omega C$	68
	$x_L > x_C$	69
	$b_L > b_C$	70
	$b_C > b_L$	71
В изображенной выше цепи $b_1 = b_2 = 0,01 \text{ Ом}^{-1}$. Найдите волновое сопротивление.	$\rho = 10 \text{ Ом}$	72
	$\rho = 100 \text{ Ом}$	73
	Приведенных данных для решения задачи недостаточно	74

Продолжение карт. № 4.6

 <p> $r_1 = r_2 = 1 \text{ Ом};$ $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = 100 \text{ Ом}; I = 1 \text{ А}.$ Определите I_1 при резонансе токов. </p>	100 А	76
	50 А	75
	0,02 А	64
	0,01 А	63
Как изменяется полное сопротивление цепи, изображенной выше, при изменении частоты приложенного напряжения от 0 до ∞ ?	Плавно уменьшается до нуля, а затем увеличивается	37
	Плавно уменьшается до минимального значения, а затем увеличивается	47
	Плавно увеличивается до максимального значения, а затем уменьшается	112
	Увеличивается до бесконечности, а затем уменьшается	100

4.7. Использование электрического резонанса в технических устройствах

При резонансе напряжений ток в контуре достигает максимального значения, а напряжение на конденсаторе U_C и индуктивности U_L превышает приложенное напряжение в Q раз.

При резонансе токов сопротивление цепи резко возрастает, а токи в параллельных ветвях могут значительно превышать ток в неразветвленной части цепи. Контур ведет себя по отношению к источнику как цепь с чисто активным сопротивлением.

Эти свойства резонансных контуров широко используются в технике.

В антенне радиоприемника действуют различные по частоте напряжения, вызываемые сигналами передающих устройств.

Чтобы выделить сигналы, лежащие в полосе частот нужной радиостанции, используют колебательный контур, параметры которого подобраны так, что в нем возникает электрический резонанс на частоте принимаемой радиостанции.

Изменение параметров контура производят либо при помощи вариометра (катушки с переменной индуктивностью), либо при помощи конденсатора переменной емкости.

Резонансные явления используют в устройствах, предназначенных для умножения и преобразования частоты. Получение ряда высокочастотных колебаний стабильной частоты связано с техническими трудностями. Поэтому иногда генерируют импульсы специальной формы, при разложении которых в ряд Фурье значительную роль играют высшие гармоники, а затем выделяют нужные гармоники при помощи фильтров, состоящих из резонансных контуров.

В электротехнике широко применяются устройства, в которых резонансные явления используются для стабилизации напряжения, регулирования частоты генераторов и других целей.

Явление резонанса токов используется для повышения коэффициента мощности электрических цепей.

Карточка № 4.7 (318)

Использование электрического резонанса в технических устройствах

Добротность контура $Q = 100$. К контуру приложено напряжение $U = 10$ В. Определите напряжение на конденсаторе при резонансе напряжений.	10 000 В	54
	1000 В	55
	100 В	56
	10 В	57
Затухание контура $d = \frac{1}{Q} = 0,01$. К контуру приложено напряжение $U = 10$ В. Определите напряжение на индуктивности при резонансе напряжений.	10 В	58
	100 В	59
	1000 В	60
	10 000 В	61

Продолжение карт. № 4.7

Входной контур приемника имеет следующие параметры: $L = 0,001$ Гн; $C = 0,1$ мкФ. Какую угловую частоту имеют колебания радиостанции, на которую настроен приемник?	10^5 с ⁻¹	62
	10^6 с ⁻¹	63
	10^7 с ⁻¹	64
	10^8 с ⁻¹	65
Генератор вырабатывает импульсы, повторяющиеся с частотой 500 в секунду. Контур настроен на 5-ю гармонику. Найдите частоту выделенных колебаний.	500 Гц	66
	2500 Гц	67
	5000 Гц	68
	100 Гц	69
Где используется явление электрического резонанса?	В радиоприемниках	70
	В стабилизаторах напряжения	71
	В регуляторах частоты	72
	Во всех перечисленных выше устройствах	74

4.8. Способы улучшения коэффициента мощности

Большинство мощных потребителей электрической энергии, в частности трансформаторы и двигатели, имеют значительную индуктивность и заметно снижают коэффициент мощности цепи.

Чтобы разгрузить линию электропередачи от реактивной мощности, используют специальные устройства и поддерживают режимы работы потребителей близкими к номинальным. Рассмотрим способы улучшения коэффициента мощности.

1. Параллельно потребителю (или группе потребителей) включается батарея конденсаторов. Если емкость конденсаторов подобрать таким образом, чтобы в контуре, образованном потребителем и блоком конденсаторов, возник ре-

зонанс токов, из сети будет потребляться только активная мощность.

На рис. 4.11 изображена схема замещения нагрузки, потребляющей активный I_a и реактивный (индуктивный) I_p токи, параллельно которой подключен конденсатор C . Найдем величину емкости конденсатора, необходимую для уменьшения угла сдвига по фазе между током I на входе цепи и напряжением U на ее зажимах от φ до φ_1 .

На рис. 4.12 изображена векторная диаграмма рассматриваемой схемы. Активная составляющая I_a тока I совпадает по фазе с напряжением U , реактивная составляющая I_p — отстает на 90° .

$$\dot{I}_a + \dot{I}_{p1} = \dot{I}_1.$$

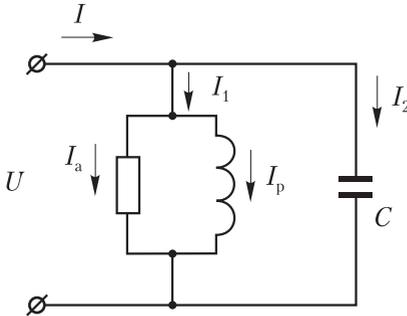


Рис. 4.11

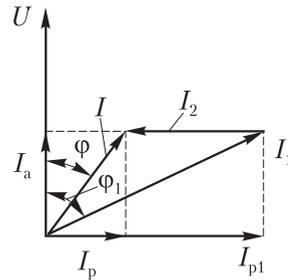


Рис. 4.12

Ток конденсатора I_2 опережает напряжение по фазе на 90° .

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}.$$

Из диаграммы находим

$$I_2 = I_p + I_{p1},$$

где I_p — реактивная составляющая тока I ;

$$I_p = I_a \operatorname{tg} \varphi; \quad I_{p1} = I_a \operatorname{tg} \varphi_1.$$

После подстановки получаем

$$I_2 = I_a (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1).$$

С другой стороны, на оснований закона Ома,

$$I_2 = \frac{U}{X_C} = U\omega C.$$

Приравнивая правые части двух последних выражений, получаем

$$U\omega C = I_a (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1),$$

откуда

$$C = \frac{I_a}{U\omega} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1) = \frac{UI_a}{U^2\omega} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1).$$

Принимая во внимание, что

$$UI_a = UI \cos \varphi = P,$$

окончательно записываем

$$C = \frac{P}{U^2\omega} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_1).$$

Здесь P — активная мощность потребителя.

Если требуется осуществить полную компенсацию, т.е. довести коэффициент мощности до единицы, то величина емкости

$$C = \frac{P}{U^2\omega} \operatorname{tg} \varphi,$$

так как

$$\varphi_1 = 0; \operatorname{tg} \varphi_1 = 0.$$

При наличии понижающего трансформатора конденсаторы могут быть включены как со стороны высокого, так и со стороны низкого напряжения. При пониженном напряжении требуются конденсаторы большей емкости, при повышенном напряжении повышаются требования к изоляции. Окончательное решение принимается на основании технико-экономического сравнения.

2. Расчеты показывают, что при большой мощности потребителя размеры конденсаторного блока, улучшающего коэффициент мощности, оказываются неприемлемо большими. В этих случаях вместо конденсаторов устанавливаются специальные машины, потребляющие реактивный ток, опережающий напряжение по фазе. Такие машины называют синхронными компенсаторами.

3. Электрические машины и трансформаторы потребляют реактивный ток, который в широких пределах изменения нагрузки остается постоянным. Поэтому угол φ тем меньше, а коэффициент мощности потребителя тем больше, чем больше активная нагрузка и активная составляющая тока (рис. 4.13). Зависимость $\cos \varphi$ от активной нагрузки, характерная для электрических двигателей и трансформаторов, изображена на рис. 4.14. Очевидно, что $\cos \varphi$ достигает максимума при нормальной нагрузке P_n . Поэтому не следует использовать недогруженные трансформаторы и двигатели. Мощность установленных трансформаторов и двигателей должна соответствовать потребностям предприятия.

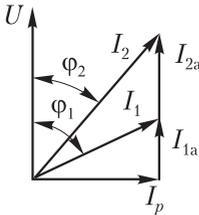


Рис. 4.13

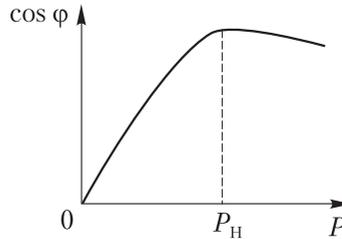
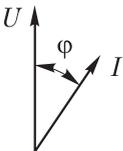


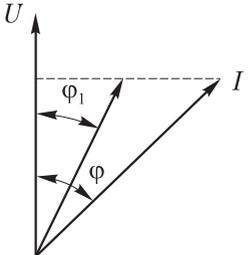
Рис. 4.14

Карточка № 4.8 (166)

Способы улучшения коэффициента мощности

 <p>Потребитель характеризуется этой векторной диаграммой. Параллельно потребителю подключен конденсатор. Определите ток конденсатора I_c при котором $\cos \varphi = 1$.</p>	$I_c = I$	15
	$I_c = I \cos \varphi$	16
	$I_c = I \sin \varphi$	17

Продолжение карт. № 4.8

 <p>Определите ток конденсатора, при котором угол φ уменьшится до φ_1.</p>	$I_C = I(\sin\varphi - \sin\varphi_1)$	18
	$I_C = I\cos\varphi(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1)$	19
<p>Найденный выше ток I_C равен $U\omega C$. Определите C.</p>	$C = \frac{I_C}{U\omega}$	20
	$C = \frac{I\cos\varphi}{U\omega}(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1)$	21
<p>Что надо сделать, чтобы от найденного выше выражения для C перейти к выражению</p> $C = \frac{P}{U^2\omega}(\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_1)?$	Умножить числитель и знаменатель найденного выражения на U	22
	Такой переход невозможен	23
<p>Сопrotивление нагрузки имеет индуктивный характер. Что надо сделать, чтобы разгрузить линию от реактивной мощности? (Укажите неверный ответ.)</p>	Параллельно нагрузке подсоединить специально подобранный конденсатор	84
	Параллельно нагрузке подсоединить синхронный компенсатор	85
	Обеспечить работу потребителей при номинальных режимах	86
	Последовательно с нагрузкой включить конденсатор и получить резонанс напряжений	87

ГЛАВА 5

СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Основные понятия

При рассмотрении цепей постоянного тока мы изучили различные методы расчета этих цепей.

Возникает вопрос: нельзя ли известные методы расчета цепей постоянного тока использовать для расчета цепей переменного тока?

Чтобы ответить на этот вопрос, надо обратиться к законам Ома и Кирхгофа, на которых базируются все методы расчета. Если форма записи законов будет одинакова как для цепей постоянного, так и для цепей переменного тока, то одинаковыми будут и методы расчета этих цепей.

Уравнения Кирхгофа, записанные для цепи постоянного тока, связывают численные значения сопротивлений, токов и напряжений, действующих в цепи. Эти численные значения не изменяются с течением времени и на каждом участке цепи линейно связаны законом Ома

$$U = I \cdot R.$$

В цепях переменного тока дело обстоит значительно сложнее: токи и напряжения на отдельных участках цепи непрерывно меняются, а связи между ними записываются в дифференциальной форме:

$$u_L = L \frac{di}{dt}; \quad i_C = C \frac{du}{dt}.$$

Однако если бы удалось найти такую запись для синусоидальных токов и напряжений, которая содержала бы только постоянные параметры, и показать справедливость уравнений Ома и Кирхгофа в такой записи, то задача была бы решена.

В общем случае синусоидальный ток определен, а график его может быть построен, если известны три числа, выражающие начальную фазу ψ , амплитуду I_m (или действующее значение I) и частоту тока f . В большинстве случаев частота тока известна, поэтому для построения графика тока или напряжения нужно знать две величины: начальную фазу и амплитуду (или действующее значение).

При заданной частоте синусоидальный ток можно представить в виде вектора, длина которого в определенном масштабе равна амплитуде, а угол относительно горизонтальной оси — начальной фазе тока. В свою очередь, вектор можно изобразить комплексным числом, модуль которого определяет длину вектора, а аргумент — угол поворота вектора относительно горизонтальной оси. Таким образом, синусоидальный ток может быть изображен комплексным числом.

При изучении векторных диаграмм мы видели, что законы Кирхгофа, записанные в векторной форме, справедливы для цепей переменного тока. Следовательно, эти законы будут справедливы и при записи их при помощи комплексных чисел.

Условимся обозначать комплексные числа соответствующие векторам, изображающим синусоидальные ЭДС, напряжения и токи, символически буквами \dot{E} , \dot{U} , \dot{I} .

Метод расчета цепей переменного тока, основанный на использовании комплексных чисел, называется методом комплексных чисел. Так как при этом методе используется символическая форма записи основных законов и соотношений, его также называют символическим методом.

Карточка № 5.1 (419)

Основные понятия

Через катушку проходит ток $i = I_m \sin \omega t$. Найдите падение напряжения в индуктивном сопротивлении катушки.	$u_L = ix_L$	90
	$u_L = I_m x_L \cos \omega t$	89

Продолжение карт. № 5.1

Напряжение на конденсаторе изменяется по закону $u = U_m \sin \omega t$. Какой ток проходит в цепи кон- денсатора?	$i = \frac{u}{x_C}$	88
	$i = \frac{U_m}{x_C} \cos \omega t$	87
Можно ли отобразить: а) синусоидальную функцию вре- мени вектором; б) вектор комплексным числом?	а) Можно; б) нельзя	86
	а) Можно; б) можно	85
	а) Нельзя; б) нельзя	84
	а) Нельзя; б) можно	83
Укажите строку, в которой запи- саны: а) действующее значение напря- жения; б) вектор (комплексное число), изображающий напряжение.	а) \dot{U} ; б) U	82
	а) U ; б) U_m	81
	а) U ; б) \dot{U}	80
Можно ли использовать методы расчета цепей постоянного тока для расчета сложных цепей пере- менного тока?	Нельзя	79
	Можно, если рас- четы производить символическим методом	78

5.2. Изображение синусоидального тока (напряжения) вектором

Напомним, что между синусоидой тока и вращающимся вектором устанавливается однозначное соответствие, если выполнены следующие условия: длина вектора в определенном масштабе равна амплитудному значению тока I_m ; начало вектора совмещено с началом координат; вектор образует с

положительным направлением горизонтальной оси угол ψ , равный начальной фазе синусоидального тока; вектор вращается против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$; берутся проекции вектора на вертикальную ось.

Пусть задан синусоидальный ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

Построим график этого тока. Он имеет вид синусоиды, изображенной на рис. 5.1. Рядом изображен вектор, соответствующий построенной синусоиде. Этот вектор с модулем, равным амплитуде, наклонен к горизонтальной оси под углом ψ .

Обычно переход от аналитической записи синусоидального тока к изображающему вектору производится без построения синусоидальной кривой, непосредственно по виду самой формулы.

Так, например, формуле

$$i = 10 \sin\left(314t + \frac{\pi}{4}\right)$$

соответствует вектор, модуль которого равен 10, в исходном положении наклоненный к горизонтальной оси под углом 45° .

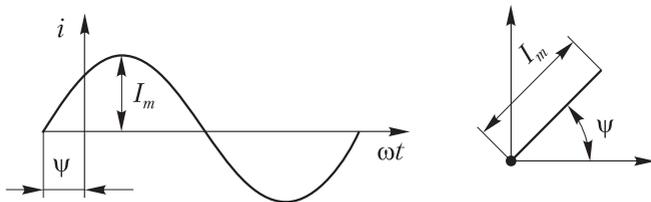


Рис. 5.1

Этот вектор вращается против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega = 314$ радиан в секунду (50 об/с); вращение вектора подразумевается, а на рисунках векторы изображаются неподвижными. На рис. 5.2 приведен еще ряд примеров однозначного соответствия между синусоидой и вектором. Здесь также вращение векторов подразумевается и на рисунках не отображено.

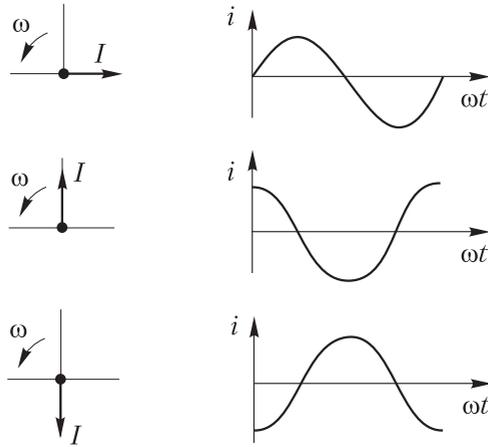


Рис. 5.2

Обратно, по величине вектора и его положению можно написать аналитическое выражение соответствующего ему тока. Например, вектору, модуль которого равен 5, образующему с положительным направлением горизонтальной оси угол 90° , соответствует ток

$$i = 5 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

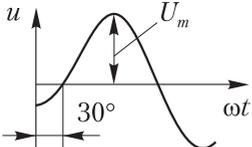
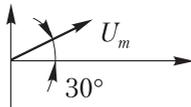
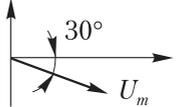
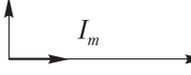
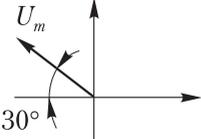
Угловая частота тока ω предполагается известной. Все сказанное выше относится и к синусоидальному напряжению.

Карточка № 5.2 (149)

Изображение синусоидального тока (напряжения) вектором

		24
<p>Укажите вектор, изображающий этот синусоидальный ток.</p>		25

Продолжение карт. № 5.2

		26
<p>Какой вектор изображает это синусоидальное напряжение?</p>		27
<p>Частота переменного тока 50 Гц. С какой скоростью вращается вектор, изображающий этот ток?</p>	50 об/мин	28
	50 рад/с	29
	50 об/с	30
$i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$		31
<p>Укажите вектор, изображающий этот синусоидальный ток.</p>		32
	$u = U_m \sin (\omega t + 30^\circ)$	33
<p>Какое синусоидальное напряжение изображается этим вектором?</p>	$u = U_m \sin 150^\circ$	34
	$u = U_m \sin (\omega t + 150^\circ)$	35

5.3. Изображение вектора комплексным числом

Мы рассмотрели, как можно изобразить неподвижным вектором любую синусоидальную функцию времени. Рассмотрим теперь способ изображения вектора комплексным числом.

Возьмем прямоугольную систему координат (рис. 5.3) и условимся откладывать по горизонтальной оси вещественные числа, а по вертикальной оси — мнимые числа. Совместим начало вектора с началом координат. Конец вектора окажется совмещенным с некоторой точкой на плоскости. Этой точке

соответствует определенное комплексное число. Следовательно, заданному вектору соответствует единственное комплексное число. Так, например, на рис. 5.3 вектору \dot{I} соответствует точка M_1 , вектору \dot{U} соответствует точка M_2 .

Любой вектор в комплексной плоскости изображается отрезком, длина которого в определенном масштабе выражает модуль вектора. Направление вектора определяется углом, отсчитываемым от положительного направления оси действительных величин. Если угол отсчитывается против часовой стрелки, он берется со знаком плюс. Если угол отсчитывается в направлении вращения часовой стрелки, он берется со знаком минус.

Рассмотрим различные формы записи комплексного числа. Действительная часть a комплексного числа откладывается по оси действительных величин, коэффициент b при мнимой части — по оси мнимых величин.

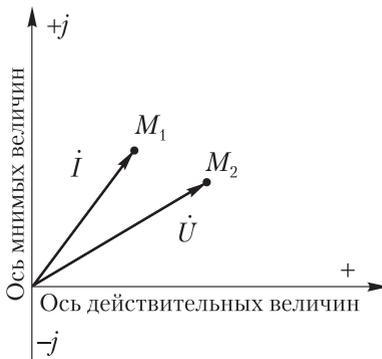


Рис. 5.3

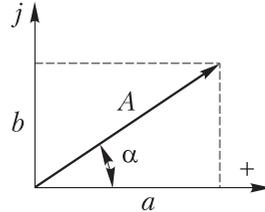


Рис. 5.4

Вектор A (рис. 5.4) изображается комплексным числом

$$\dot{A} = a + jb.$$

Это выражение называют алгебраической формой записи комплексного числа.

На основании рис. 5.4 можно записать

$$a = A \cos \alpha; \quad b = A \sin \alpha.$$

Следовательно,

$$\dot{A} = A(\cos \alpha + j \sin \alpha).$$

Это выражение называют тригонометрической формой записи комплексного числа. Здесь A — модуль комплексного числа — находится по теореме Пифагора:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2},$$

а угол α определяется по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a} = \frac{A \sin \alpha}{A \cos \alpha}.$$

По формуле Эйлера

$$\cos \alpha + j \sin \alpha = e^{j\alpha}.$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Используя это равенство, представим комплексное число в показательной форме:

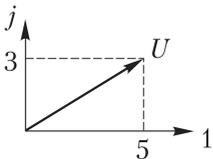
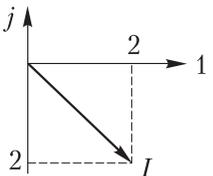
$$\dot{A} = Ae^{j\alpha}.$$

Таким образом,

$$\dot{A} = a + jb = A(\cos \alpha + j \sin \alpha) = Ae^{j\alpha}.$$

Карточка № 5.3 (142)

Изображение вектора комплексным числом

 <p>Какое число соответствует вектору?</p>	$j3$	120
	5	221
	$5 + j3$	322
 <p>Изобразите вектор \dot{A} комплексным числом в алгебраической форме.</p>	$2 + j2$	23
	$2 - j2$	24
	$2\sqrt{2}$	25

Продолжение карт. № 5.3

Определите: а) модуль; б) направление вектора \dot{A} , изображенного на рис. 5.4, при условии $a = b = 2$.	а) 4; б) $\operatorname{tg} \alpha = -1; \alpha = -45^\circ$	26
	а) $2\sqrt{2}$; б) $\operatorname{tg} \alpha = +1; \alpha = -45^\circ$	27
	а) 4; б) $\operatorname{tg} \alpha = 1; \alpha = 45^\circ$	28
Запишите комплексное число \dot{I} в тригонометрической форме, при условии $I = 2\sqrt{2}$; $\alpha = -45^\circ$.	$\dot{I} = 2\sqrt{2} (\cos 45^\circ + j \sin 45^\circ)$	229
	$\dot{I} = 2\sqrt{2} (\cos 45^\circ - j \sin 45^\circ)$	30
	$I = 2\sqrt{2}$	31
Запишите комплексное число \dot{I} в показательной форме.	$\dot{I} = 2\sqrt{2} e^{j45^\circ}$	32
	$\dot{I} = 2\sqrt{2} e^{-j45^\circ}$	33
	$e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \sin \alpha$	134

5.4. Запись синусоидальных токов и напряжений в символической форме. Переход от символической записи к синусоидальной функции времени

Записать ток (напряжение) в символической форме — это значит представить его в виде комплексного числа.

Мы уже научились изображать синусоидальные функции времени векторами, а векторы представлять комплексными числами. Проследив за нашими рассуждениями, нетрудно установить правила непосредственного перехода от синусоидальной функции времени к соответствующему комплексному числу.

Пусть к цепи приложено синусоидальное напряжение

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

Запишем это напряжение в символической форме. Построим, как это сделано на рис. 5.5, слева — график (синусоиду) напряжения и справа — его вектор в комплексной плоскости. Полученный вектор представим комплексным числом:

$$\dot{U}_m = U_m (\cos \psi_u + j \sin \psi_u).$$

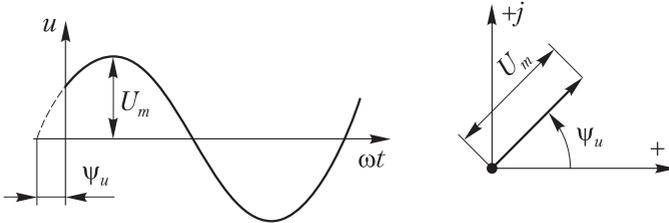


Рис. 5.5

Это тригонометрическая форма записи. Применяв формулу Эйлера, получим показательную форму:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}.$$

Еще пример. В ветви проходит ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Требуется записать этот ток в символической форме. Сравнивая между собой написанные выше равенства, замечаем порядок перехода от синусоидальной функции времени к комплексному числу.

Действуя по аналогии, находим

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m (\cos \psi_i + j \sin \psi_i).$$

Выше в символической записи токов и напряжений мы использовали амплитудные значения. Для практических расчетов удобнее пользоваться действующими значениями. Поэтому считают, что функции времени

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$

соответствует комплексное число

$$\dot{U} = Ue^{j\Psi_u},$$

а функции

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$$

– комплексное число

$$\dot{I} = Ie^{j\Psi_i}.$$

Мы научились записывать комплексными числами синусоидальные токи и напряжения. Не вызывает затруднений и обратный переход от символической записи к синусоидальной функции времени. Например, комплексному числу

$$\dot{I} = 10e^{j30^\circ}$$

соответствует синусоидальный ток

$$i = 10\sqrt{2}\sin(\omega t + 30^\circ);$$

комплексному числу

$$\dot{U} = 100e^{j0^\circ}$$

– синусоидальное напряжение

$$u = 141\sin \omega t.$$

В последнем случае начальная фаза равна нулю, а вектор напряжения расположен вдоль положительного направления оси действительных величин.

Карточка № 5.4 (379)

Запись синусоидальных токов и напряжений в символической форме. Переход от символической записи к синусоидальной функции времени

$u = 100 \sin(\omega t - 30^\circ).$ Запишите комплексное число, изображающее это синусоидальное напряжение.	$\dot{U}_m = 100e^{j(\omega t - 30^\circ)}$	90
	$\dot{U}_m = 100e^{j30^\circ}$	91
	$\dot{U}_m = 100e^{-j30^\circ}$	92

Продолжение карт. № 5.4

$u = 100\sin(\omega t + 135^\circ)$. Комплексное число, соответствующее этому напряжению, запишите в показательной и алгебраической формах. $\cos 135^\circ = -\frac{\sqrt{2}}{2}$; $\sin 135^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$.	$\dot{U} = \frac{100}{\sqrt{2}}e^{j135^\circ} = -50 + j50$	293
	$\dot{U} = 100e^{j135^\circ} = -50\sqrt{2} + j50\sqrt{2}$	294
$i = 10\cos \omega t$. Укажите комплексное число, изображающее этот ток.	$\dot{i} = \frac{10}{\sqrt{2}}e^{j0^\circ}$	95
	$\dot{i} = \frac{10}{\sqrt{2}}e^{j90^\circ}$	96
$\dot{i} = \frac{10}{\sqrt{2}}e^{-j30^\circ}$. Какой синусоидальный ток изображается этим комплексным числом?	$i = \frac{10}{\sqrt{2}}\sin(\omega t - 30^\circ)$	197
	$i = 10\sin(\omega t - 30^\circ)$	98
	$i = 10\sin(-30^\circ)$	99
$\dot{U} = 100e^{j180^\circ}$. Какое напряжение изображается этим комплексным числом?	$u = -100\sqrt{2}\sin \omega t$	100
	$u = -100\sin \omega t$	101
	$u = 100\sqrt{2}\sin \omega t$ $u = 0$	102

5.5. Выражение сопротивлений и проводимостей в комплексной форме. Выражение электрической мощности в комплексной форме

Пусть известны напряжение u и ток i , проходящий в какой-либо ветви сложной цепи переменного тока:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Представим эти величины в символической записи:

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u}; \quad \dot{I} = I e^{j\psi_i}$$

и найдем их отношение, которое обозначим буквой \dot{Z} :

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)}.$$

Здесь U, I — действующие значения тока и напряжения; мы знаем, что их отношение равно полному сопротивлению цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

Разность начальных фаз напряжения и тока представляет собой угол φ сдвига по фазе между током и напряжением:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Таким образом,

$$\dot{Z} = z e^{j\varphi}.$$

Величину \dot{Z} называют комплексом полного сопротивления ветви. Применив формулу Эйлера, получим:

$$\dot{Z} = z(\cos\varphi + j\sin\varphi).$$

Известно, что

$$z \cos \varphi = r; z \sin \varphi = x.$$

Следовательно,

$$\dot{Z} = r + jx.$$

Таким образом, полное сопротивление ветви (или цепи в целом) выражается комплексным числом, действительная часть которого равна активному сопротивлению ветви, а коэффициент при мнимой части — реактивному сопротивлению ветви.

Величину, обратную комплексу полного сопротивления, назовем полной проводимостью

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{z} e^{j\varphi} = y (\cos \varphi - j \sin \varphi) = g - jb.$$

Найдем также выражение электрической мощности в комплексной форме. Пусть известны комплекс напряжения на зажимах ветви (или цепи)

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u}$$

и комплекс тока в этой ветви

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} = I (\cos \psi_i + j \sin \psi_i).$$

Сопряженным комплексным числом называется такое, которое отличается от данного только знаком при мнимой части.

Поэтому сопряженный комплекс тока (обозначим его \dot{I}^*) имеет вид

$$\dot{I}^* = I (\cos \psi_i - j \sin \psi_i) = I e^{-j\psi_i}.$$

Покажем, что произведение комплекса напряжения U на сопряженный комплекс тока \dot{I}^* дает комплексное выражение для полной мощности

$$\dot{U} \dot{I}^* = U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)}.$$

Разность начальных фаз ($\psi_u - \psi_i$) представляет собой угол φ сдвига по фазе между током и напряжением. Следовательно,

$$UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi} = S(\cos \varphi + j\sin \varphi) = P + jQ = \tilde{S}.$$

Модуль $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ полученного комплекса \tilde{S} (читается « S с тильдой») равен полной мощности ветви (или цепи в целом). Действительная часть комплекса мощности равна активной мощности, а коэффициент при мнимой единице — реактивной мощности.

Карточка № 5.5 (114)

Выражение сопротивлений и проводимостей в комплексной форме. Выражение электрической мощности в комплексной форме

Напряжение $u = 100 \sin(\omega t - 30^\circ)$ создает в ветви ток $i = 10 \sin(\omega t - 75^\circ)$. Найдите комплекс полного сопротивления ветви.	$\dot{Z} = 10e^{-j45^\circ}$	103
	$\dot{Z} = 10e^{j45^\circ}$	104
	$\dot{Z} = 10e^{-j105^\circ}$	105
$\dot{Z} = 10\sqrt{2}e^{-j45^\circ}$. Найдите активное и реактивное сопротивление ветви.	$r = 10$ Ом; $x = 10$ Ом	106
	$r = 10$ Ом; $x = -10$ Ом	107
	Для решения задачи недостаточно данных	108
	$r = 10\sqrt{2}$ Ом; $x = -10\sqrt{2}$ Ом	109
$\dot{Z} = 100e^{j30^\circ}$. Определите сдвиг по фазе между током и напряжением.	Ток и напряжение совпадают по фазе	110
	Ток опережает напряжение по фазе на 30°	111
	Ток отстает от напряжения по фазе на 30°	112
Комплекс полного сопротивления ветви $\dot{Z} = 100e^{j90^\circ}$. Определите комплекс полной проводимости этой ветви.	$\dot{Y} = 100e^{-j90^\circ}$	113
	$\dot{Y} = 0,01e^{j90^\circ}$	114
	$\dot{Y} = 0,01e^{-j90^\circ}$	145

Продолжение карт. № 5.5

$\dot{U}_m = 100\sqrt{2}e^{j15^\circ}, \text{В};$ $\dot{i} = 10e^{j60^\circ}, \text{А}.$ Найдите активную и реактивную мощности цепи.	$P = 1000 \text{ Вт};$ $Q = -1000 \text{ ВАр}$	146
	$P = 1000 \text{ Вт};$ $Q = 1000 \text{ ВАр}$	147
	$P = 1000\sqrt{2} \text{ Вт};$ $Q = 1000 \text{ ВАр}$	148

5.6. Законы Ома и Кирхгофа в символической форме

Вводя комплекс полного сопротивления ветви, мы определили его как отношение комплекса напряжения к комплексу тока:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{i}}.$$

Это равенство выражает закон Ома для участка цепи переменного тока, записанный в символической форме.

Отсюда получаем:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}; \dot{U} = \dot{Z}\dot{i}.$$

Комплексный ток в ветви равен комплексному напряжению на ее зажимах, деленному на комплексное полное сопротивление ветви.

Умножение и деление комплексных чисел удобно производить, когда они записаны в показательной форме:

$$\dot{i} = Ie^{j\psi_i} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{ze^{j\varphi}} = \frac{U}{z}e^{j(\psi_i - \varphi)};$$

$$\dot{U} = Ue^{j\psi_u} = ze^{j\varphi} \cdot Ie^{j\psi_i} = zIe^{j(\psi_i + \varphi)}.$$

Переход от алгебраической формы записи комплексных чисел к показательной форме производится по формулам, приведенным ранее.

Обратимся к законам Кирхгофа. Поскольку сложение синусоидальных токов мы заменили сложением векторов, а сложение векторов — сложением комплексных чисел, можно следующим образом сформулировать первый закон Кирхгофа для цепей переменного тока: алгебраическая сумма комплексных токов в узле (точке разветвления) равна нулю:

$$\sum \dot{i} = 0.$$

При записи уравнений комплексы токов, стрелки которых направлены к узлу, считают положительными, а комплексы токов, стрелки которых направлены от узла, — отрицательными.

В соответствии со сказанным для схемы, изображенной на рис. 5.6, запишем

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_3 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0.$$

Это уравнение позволяет найти неизвестный ток, если четыре других тока известны, или выразить один из токов через четыре остальных.

Второй закон Кирхгофа в символической форме записывается следующим образом:

$$\sum \dot{E} = \sum Z\dot{I}.$$

Алгебраическая сумма комплексов синусоидальных ЭДС, действующих в контуре, равна алгебраической сумме комплексов падений напряжения на участках контура.

На схеме стрелками указываются положительные направления ЭДС, напряжений и токов. При записи уравнения произвольно выбирают направление обхода контура. Комплексы ЭДС и токов, стрелки которых совпадают с направлением обхода, берут со знаком плюс. Комплексы ЭДС и токов, стрелки которых направлены против направления обхода, берут со знаком минус.

Например, для левого контура схемы, изображенной на рис. 5.7, уравнение второго закона Кирхгофа имеет вид

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I} Z;$$

для внешнего контура получаем

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2.$$

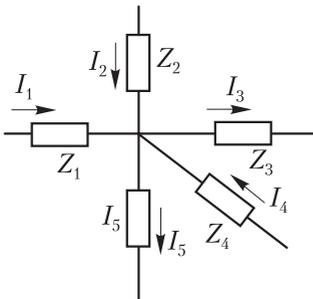


Рис 5.6

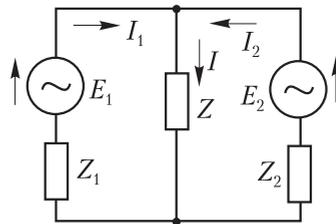


Рис. 5.7

При расчетах сложение и вычитание комплексных чисел производятся, когда они записаны в алгебраической форме.

Переход от показательной формы к алгебраической осуществляется по формулам, приведенным ранее:

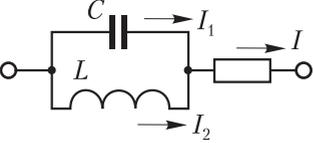
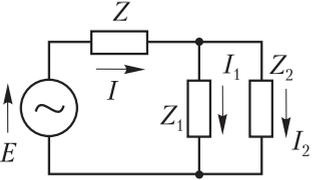
$$\dot{A} = Ae^{j\alpha} = A\cos\alpha + jA\sin\alpha = a + jb.$$

Карточка 5.6 ((284))

Законы Ома и Кирхгофа в символической форме

Как записывается закон Ома в символической форме?	$I = \frac{U}{z}$	49
	$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{z}$	50
	$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}$	51
$\dot{U}_m = 100e^{j30^\circ}$; $\dot{Z} = 10e^{j15^\circ}$. Найдите комплекс тока.	$10e^{j45^\circ}$	52
	$10e^{j15^\circ}$	53
	$10e^{-j15^\circ}$	54
$\dot{U} = 100\sqrt{2}e^{j0^\circ} = 100\sqrt{2}$; $\dot{Z} = 10 + j10$. Найдите комплекс тока.	$10e^{j45^\circ}$	55
	$10e^{-j45^\circ}$	56
	$10\sqrt{2}e^{j90^\circ}$	57
	$10e^{-j90^\circ}$	58

Продолжение карт. № 5.6

 <p> $I_1 = 10 e^{j90^\circ};$ $I_2 = 10 e^{-j90^\circ}.$ Найдите ток \dot{I}. </p>	$\dot{I} = 0$	59
	$\dot{I} = 20$	60
	$\dot{I} = j20$	61
 <p> $Z = 10 e^{j90^\circ}; Z_2 = 5 e^{j90^\circ};$ $I = 2\sqrt{2}e^{-j45^\circ};$ $I_2 = \sqrt{2}e^{-j45^\circ}.$ Определите ЭДС. </p>	$\dot{E} = 25 - j25$	62
	$\dot{E} = 100 - j100$	63
	$\dot{E} = 100 + j50$	64
	$\dot{E} = 25 = j25$	65

5.7. Пример расчета неразветвленной электрической цепи

Рассмотрим порядок расчета неразветвленной электрической цепи, изображенной на рис. 5.8.

Заданы величины R_1 , C_1 , L , C_2 , R_2 , ω и действующее значение приложенного к цепи напряжения U . Определить действующее значение напряжения на индуктивности U_L и сдвиг по фазе между U_L и U .

1. Определяем величины индуктивного и емкостных сопротивлений:

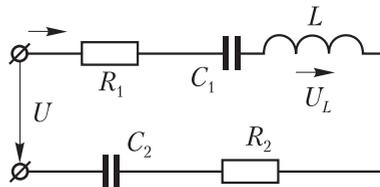


Рис 5.8

$$x_{C1} = \frac{1}{\omega C_1}; x_L = \omega L; x_{C2} = \frac{1}{\omega C_2}.$$

2. Определяем активное и реактивное сопротивления цепи:

$$R = R_1 + R_2; x = x_L - x_{C1} - x_{C2}.$$

3. Записываем комплекс полного сопротивления цепи:

$$\dot{Z} = R + jx = ze^{j\varphi}.$$

Здесь

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2}; \operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{R}.$$

4. Направляем вектор приложенного напряжения по оси действительных величин и выражаем его комплексным числом:

$$\dot{U} = Ue^{j0^\circ}.$$

5. Определяем комплекс тока в цепи:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{U}{z} e^{j(0^\circ - \varphi)} = \frac{U}{z} e^{-j\varphi}.$$

6. Записываем в виде комплекса сопротивление индуктивности:

$$z_L = 0 + jx_L = x_L e^{j90^\circ}.$$

Здесь

$$z_L = \sqrt{0^2 + x_L^2} = x_L;$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L}{0} = \infty; \varphi = 90^\circ.$$

7. Определяем комплексное напряжение на индуктивности:

$$\dot{U}_L = \dot{I}z_L = \frac{U}{z} e^{-j\varphi} \cdot x_L e^{j90^\circ} = \frac{Ux_L}{z} e^{j(90^\circ - \varphi)}.$$

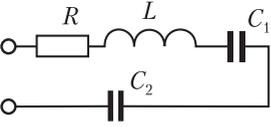
8. По найденному комплексу \dot{U}_L определяем действующее значение падения напряжения на индуктивности:

$$U_L = \frac{Ux_L}{z}$$

и сдвиг по фазе между приложенным напряжением и напряжением на индуктивности, равный ($90^\circ - \varphi$).

Карточка № 5.7 (363)

Пример расчета неразветвленной электрической цепи

 <p> $u = 100 \sin \omega t$; $R = x_L = 3 \text{ Ом}$; $x_{C_1} = x_{C_2} = 3,5 \text{ Ом}$. </p> <p>Определите комплекс полного сопротивления цепи.</p>	$\dot{Z} = 3 - j4$	66
	$\dot{Z} = 3 - j7$	67
	$\dot{Z} = 3 + j10$	68
<p>Найдите комплекс тока в цепи, изображенной выше. $\text{tg } 53^\circ 10' = 1,33$.</p>	$\dot{i} = \frac{20}{\sqrt{2}} e^{-j53^\circ 10'}$	69
	$\dot{i} = \frac{20}{\sqrt{2}} e^{j53^\circ 10'}$	70
	$\dot{i} = 20 e^{-j53^\circ 10'}$	71
<p>Найдите выражение тока, проходящего в этой цепи</p>	$i = \frac{20}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + 53^\circ 10')$	72
	$i = 20 \sin(\omega t + 53^\circ 10')$	73
	$i = 20 \sin(-53^\circ 10')$	74
<p>Найдите комплекс напряжения на конденсаторе C_2.</p>	$\dot{U}_{C_2} = \frac{70}{\sqrt{2}} e^{-j36^\circ 50'}$	75
	$\dot{U}_{C_2} = 70 e^{-j36^\circ 50'}$	76
	$\dot{U}_{C_2} = \frac{70}{\sqrt{2}} e^{j36^\circ 50'}$	77

Продолжение карт. № 5.7

Найдите выражение напряжения на конденсаторе.	$u_{C_2} = 70\sin 36^\circ 50'$	78
	$u_{C_2} = 70\sin(\omega t - 36^\circ 50')$	79
	$u_{C_2} = 70\sin(\omega t + 36^\circ 50')$	80

5.8. Применение символического метода к расчету разветвленных цепей переменного тока

Если сложная электрическая цепь содержит ЭДС только в одной ветви, расчет сводится к эквивалентному преобразованию схемы и применению закона Ома.

На рис. 5.9, а изображена разветвленная цепь с одной ЭДС.

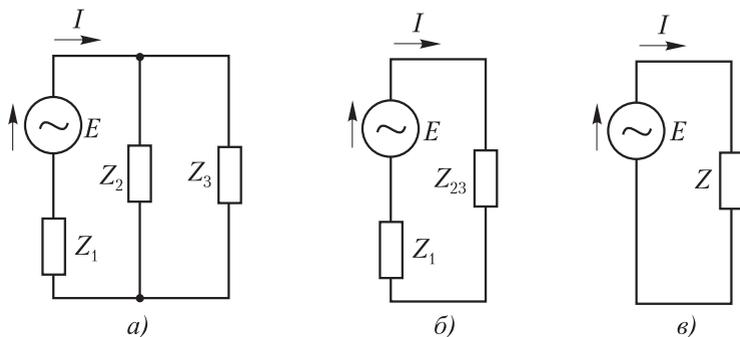


Рис. 5.9

Дано:

$$\dot{E} = Ee^{j0^\circ};$$

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jx_1 = z_1e^{j\varphi_1};$$

$$\dot{Z}_2 = R_2 + jx_2 = z_2e^{j\varphi_2};$$

$$\dot{Z}_3 = R_3 + jx_3 = z_3e^{j\varphi_3}.$$

Требуется определить ток, отдаваемый источником электрической энергии, коэффициент мощности цепи, токи в ветвях и напряжение на параллельном участке.

1. Заменяем параллельно соединенные сопротивления Z_2 и Z_3 эквивалентным сопротивлением Z_{23} (рис. 5.9, б):

$$z_{23} = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}.$$

2. Заменяем последовательно соединенные сопротивления Z_1 и Z_{23} эквивалентным сопротивлением Z (рис. 5.9, в):

$$z = z_1 + z_{23} = R + jx.$$

3. Определяем ток в неразветвленной части цепи:

$$i = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}}.$$

4. Определяем коэффициент мощности цепи

$$z = \sqrt{R^2 + x^2}; \cos \varphi = \frac{R}{z}.$$

5. Находим токи в ветвях и напряжение на параллельном участке:

$$i_2 = i \frac{z_3}{z_2 + z_3}; i_3 = i \frac{z_2}{z_2 + z_3}; \\ \dot{U}_{23} = \dot{I} z_{23}.$$

Мы рассмотрели примерный порядок расчета цепи с одним источником ЭДС. Любую цепь переменного тока можно рассчитать, используя уравнения первого и второго законов Кирхгофа. Обычно задача расчета сводится к отысканию токов в ветвях. Для решения задачи необходимо составить количество уравнений, равное числу неизвестных токов.

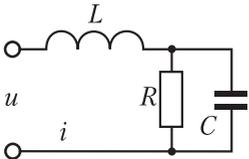
Составляют $(n-1)$ уравнений по первому закону Кирхгофа и m уравнений по второму (n — количество узлов в схеме; m — количество независимых контуров).

При составлении уравнений необходимо тщательно соблюдать правила знаков, изложенные ранее.

Аналогичным образом для расчета цепей переменного тока символическим методом можно использовать и все другие методы, разработанные для расчета цепей постоянного тока.

Карточка № 5.8 (429)

Применение символического метода к расчету
разветвленных цепей переменного тока

 <p> $R = \frac{5}{2} \text{ Ом};$ $x_L = 2,4 \text{ Ом};$ $x_C = \frac{10}{3} \text{ Ом}.$ </p> <p> $u = 100\sqrt{2} \sin \omega t.$ Найдите комплексы проводимостей параллельных ветвей. </p>	$y_r = 0,4;$ $y_c = -j0,3$	81
	$y_r = 0,4;$ $y_c = j0,3$	82
Найдите комплекс сопротивления, эквивалентного сопротивлениям параллельных ветвей. $\sin 36^\circ 50' = 0,6;$ $\cos 36^\circ 50' = 0,8.$	$\dot{Z}_{RC} = 2e^{-j36^\circ 50'}$	83
	$\dot{Z}_{RC} = 2e^{j36^\circ 50'}$	84
Найдите комплекс сопротивления, эквивалентного сопротивлению всей цепи.	$\dot{Z} = 1,6 - j1,2$	85
	$\dot{Z} = 1,6 + j1,2$	86
Найдите комплекс тока, проходящего через индуктивность.	$\dot{i} = 50e^{-j36^\circ 50'}$	87
	$\dot{i} = 50e^{j36^\circ 50'}$	88
	$\dot{i} = 100e^{j45^\circ}$	89
Укажите выражение для тока, проходящего в неразветвленной части цепи.	$i = 50 \sin(\omega t - 36^\circ 50')$	90
	$i = 50\sqrt{2} \sin(\omega t - 36^\circ 50')$	91
	$i = 50\sqrt{2} \sin(\omega t + 36^\circ 50')$	92

ГЛАВА 6

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

6.1. Причины возникновения переходных процессов. Законы коммутации

В предыдущих разделах мы рассматривали такие режимы работы электрических цепей, при которых напряжения и токи оставались неизменными в течение всего времени работы цепи или изменялись по периодическому закону.

Режим работы, при котором токи и напряжения не изменяются или изменяются по периодическому закону, называется установившимся.

Опыт показывает, что установившихся значений токи в ветвях и напряжения на участках цепи достигают не сразу, а постепенно, по мере того, как запасается энергия в емкостях и индуктивностях цепи. Электромагнитный процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому установившемуся режиму, называется переходным процессом.

Переходный процесс возникает вследствие изменения ЭДС в цепи или напряжения, приложенного к цепи, или вследствие изменения сопротивлений, индуктивностей и емкостей ветвей.

Несмотря на то что переходные процессы обычно заканчиваются в течение долей секунды, исследование переходных процессов имеет очень большое практическое значение. Переходные процессы определяют устойчивость систем автоматического управления и регулирования. Без учета и строгого расчета переходных процессов невозможно конструирование современных сложных приборов, автома-

тов, вычислительных машин как непрерывного, так и дискретного счета. Переходные процессы используются в радиотехнике (при генерации высокочастотных колебаний), импульсной технике, измерительных приборах, дистанционных взрывателях и других специальных устройствах. Переходные процессы предъявляют специальные требования к коммутационной и защитной аппаратуре.

Протекание переходных процессов нередко связано со значительным повышением токов и напряжений, опасным для обслуживающего персонала и отдельных элементов цепи. Переходные токи и напряжения могут вызвать разрушение контактов выключателя, пробой конденсаторов, порчу изоляции и т.д.

При исследовании переходных процессов отсчет времени начинают обычно с момента коммутации, т.е. полагают, что включение, выключение и переключение электрической цепи в целом или отдельных ее элементов происходят при $t = 0$ (t — время).

Расчет переходных процессов основан на законах Кирхгофа и двух законах коммутации, которые кратко можно сформулировать следующим образом:

- ток в ветви с индуктивностью не может измениться скачком;
- напряжение на конденсаторе не может измениться скачком.

Под скачком тока или напряжения понимают изменение тока или напряжения на конечную величину за бесконечно малое время.

Справедливость первого закона коммутации можно показать, воспользовавшись выражением

$$e = -L \frac{di}{dt}.$$

Предположим, что ток в ветви с индуктивностью изменился скачком, т.е. изменился на конечную величину Δi за бесконечно малое время dt . Но отношение конечной величины к бесконечно малой бесконечно велико, следовательно, ЭДС самоиндукции при нашем предположении должна достичь бесконечно большого значения, что противоречит опыту; следовательно, ток в цепи с индуктивностью скачком измениться не может.

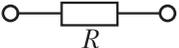
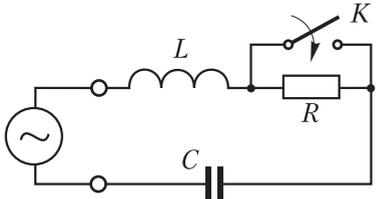
Для доказательства второго закона коммутации воспользуемся формулой

$$i = C \frac{du_C}{dt}.$$

Из этого выражения очевидно, что для того, чтобы напряжение на конденсаторе изменилось скачком, нужен бесконечно большой ток. В природе нет источников бесконечно большого тока, следовательно, напряжение на конденсаторе не может измениться скачком.

Карточка № 6.1 (226)

Переходные процессы в электрических цепях, причины их возникновения. Основные законы коммутации

 <p>Возникает ли переходный процесс при подключении этой цепи к источнику: а) постоянного; б) переменного напряжения?</p>	<p>а) Да; б) да</p>	35
	<p>а) Да; б) нет</p>	36
	<p>а) Нет; б) да</p>	37
	<p>а) Нет; б) нет</p>	38
 <p>Возникает ли переходный процесс при подключении этой цепи к источнику: а) постоянного; б) переменного напряжения?</p>	<p>а) Да; б) да</p>	39
	<p>а) Да; б) нет</p>	40
	<p>а) Нет; б) да</p>	41
	<p>а) Нет; б) нет</p>	42
 <p>Возникнет ли переходный процесс в этой цепи при замыкании контактора K?</p>	Да.	43
	Нет	44

Продолжение карт. № 6.1

Может ли ток измениться скачком: а) в ветви с емкостью; б) в ветви с индуктивностью?	а) Да; б) да	45
	а) Да; б) нет	46
	а) Нет; б) нет	47
	а) Нет; б) да	48
Может ли измениться скачком напряжение: а) на конденсаторе; б) на катушке индуктивности?	а) Да; б) да	49
	а) Да; б) нет	50
	а) Нет; б) да	60
	а) Нет; б) нет	61

6.2. Принужденные и свободные составляющие токов и напряжений

Переходные процессы в электрических цепях возникают вследствие накопления энергии в реактивных элементах схемы (конденсаторах и катушках) и освобождения этой энергии при отключении цепи от источника питания.

В соответствии с этим реальные токи, протекающие в цепи при переходном процессе, можно рассматривать как суммы принужденных и свободных составляющих:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}.$$

Аналогично, напряжения в цепи можно представить в виде

$$u = u_{\text{пр}} + u_{\text{св}}.$$

Такое представление токов и напряжений соответствует разработанным приемам решения дифференциальных уравнений. Вместе с тем, каждая из составляющих тока или напряжения имеет определенный физический смысл. При-

нужденная составляющая тока создается за счет внешнего источника электрической энергии (генератора, аккумулятора и др.). Эта составляющая не участвует в процессе накопления или освобождения энергии реактивных элементов. Наоборот, свободная составляющая тока создается только за счет энергии электрического поля конденсаторов и магнитного поля катушек.

В качестве примера рассмотрим простую электрическую цепь, изображенную на рис. 6.1. На основании второго закона Кирхгофа можно написать

$$U = u_R + u_L,$$

или

$$U = iR + L \frac{di}{dt} = (i_{\text{нп}} + i_{\text{св}})R + L \left(\frac{di_{\text{нп}}}{dt} + \frac{di_{\text{св}}}{dt} \right).$$

После того как переходные процессы затухнут и в цепи установится принужденный режим, уравнение второго закона Кирхгофа для рассматриваемой схемы примет вид

$$U = i_{\text{нп}}R + L \frac{di_{\text{нп}}}{dt}.$$

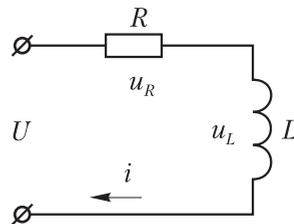


Рис. 6.1

Вычитая последнее равенство из предыдущего, получаем

$$0 = i_{\text{св}}R + L \frac{di_{\text{св}}}{dt}.$$

Таким образом, принужденная составляющая тока равна нулю и ток в цепи равен свободной составляющей $i = i_{\text{св}}$, когда напряжение на зажимах цепи равно нулю.

Мы уже отмечали, что разложение реальных токов и напряжений на две составляющие соответствует правилу решения неоднородных дифференциальных уравнений.

Как известно, общее решение линейного дифференциального уравнения с правой частью равно сумме частного решения уравнения с правой частью и общего решения уравнения без правой части.

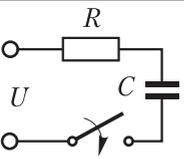
Приведенный пример показывает, что можно рассматривать ток i как общее решение неоднородного уравнения, принужденную составляющую $i_{\text{пр}}$ как частное решение неоднородного уравнения и свободную составляющую $i_{\text{св}}$ как общее решение однородного уравнения (без правой части).

Общее решение линейного однородного дифференциального уравнения содержит постоянные интегрирования, число которых равно порядку дифференциального уравнения.

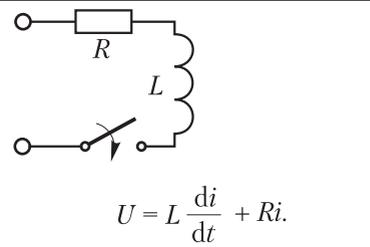
Постоянные интегрирования определяются на основании начальных условий, вытекающих из законов коммутации.

Карточка № 6.2 (421)

Принужденные и свободные составляющие токов и напряжений

Возможно ли возникновение переходного процесса в идеальной цепи с чисто активным сопротивлением?	Да	290
	Нет	289
 $U = RC \frac{du_C}{dt} + u_C.$ <p>Чему равно установившееся (принужденное) значение напряжения на конденсаторе?</p>	$u_{C\text{пр}} = U$	288
	$u_{C\text{пр}} = Ri_{\text{пр}}$	187
	$u_{C\text{пр}} = 0$	186
Укажите уравнение для свободной составляющей напряжения на конденсаторе в изображенной выше схеме.	$U = RC \frac{du_{C\text{св}}}{dt} + u_{C\text{св}}$	205
	$0 = RC \frac{du_{C\text{св}}}{dt} + u_{C\text{св}}$	84
	$0 = RC \frac{du_{C\text{св}}}{dt}$	83

Продолжение карт. № 6.2

 $U = L \frac{di}{dt} + Ri.$ <p>Чему равно установившееся (принужденное) значение тока в цепи?</p>	$i_{np} = 0$	82
	$i_{np} = \frac{U}{R}$	81
<p>Решением какого дифференциального уравнения находится свободная составляющая тока?</p>	С правой частью	80
	Без правой части	79

6.3. Включение катушки индуктивности под постоянное напряжение

В момент времени $t = 0$ контактор K замыкается (рис. 6.2), и катушка с индуктивностью L и активным сопротивлением R оказывается под постоянным напряжением U .

Найдем закон изменения тока в цепи с течением времени.

До замыкания контактора ток в цепи равен нулю:

$$\text{при } t < 0 \quad i = 0.$$

Через бесконечно большое время переходный процесс в цепи прекратится и установится постоянный по величине (принужденный) ток, для которого сопротивление индуктивности равно нулю:

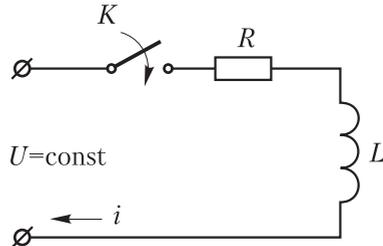


Рис. 6.2

$$\text{при } t = \infty \quad i = \frac{U}{R}.$$

Таким образом, в течение переходного процесса ток в цепи увеличивается от 0 до $\frac{U}{R}$.

На основании второго закона Кирхгофа

$$U = u_R + u_L,$$

где $u_R = iR$ — падение напряжения на активном сопротивлении; $u_L = L \frac{di}{dt}$ — падение напряжения на индуктивности.

Следовательно,

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt} + i = \frac{U}{R}.$$

Решение полученного дифференциального уравнения может быть представлено как сумма частного решения этого уравнения и общего решения уравнения без правой части:

$$i = i_{\text{нп}} + i_{\text{св}}.$$

Частным решением уравнения является установившийся или принужденный ток, удовлетворяющий уравнению при $t = \infty$, когда скорость изменения тока равна нулю:

$$i_{\text{нп}} = \frac{U}{R}.$$

Общее решение уравнения без правой части

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{di_{\text{св}}}{dt} + i_{\text{св}} = 0$$

будем искать в виде

$$i_{\text{св}} = Ae^{kt}.$$

Подставив это решение в усеченное уравнение, получим

$$\frac{L}{R} Ake^{kt} + Ae^{kt} = 0,$$

откуда

$$k = -\frac{R}{L}.$$

Следовательно,

$$i_{\text{св}} = Ae^{-\frac{R}{L}t}; i = \frac{U}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Постоянную интегрирования A найдем из начальных условий. Поскольку ток в катушке не может измениться скачком, то при

$$t = 0 \quad i = 0.$$

Подставляя эти значения в последнее выражение, найдем

$$0 = \frac{U}{R} + A; \quad A = -\frac{U}{R}.$$

Таким образом,

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

График тока представлен на рис. 6.3. Эту кривую называют экспонентой.

Величину $\tau = \frac{L}{R}$, имеющую размерность времени, принято называть постоянной времени рассматриваемой электрической цепи:

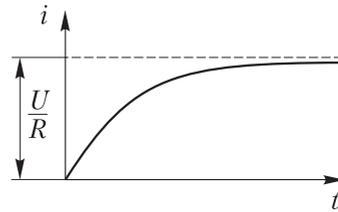


Рис. 6.3

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Теоретически переходный процесс длится бесконечно большое время. Однако считают переходный процесс практически закончившимся по истечении времени $t \approx 4\tau$, так как ток достигает при этом примерно 98% от установившегося значения.

Таким образом, ток достигает практически установившегося значения тем быстрее, чем меньше τ и, наоборот, переходный процесс затухает тем медленнее, чем больше τ .

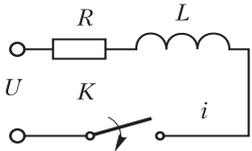
Для катушек с индуктивностью $L = 0,01$ Гн и активным сопротивлением 10 Ом

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,01}{10} = 0,001 \text{ с.}$$

Следовательно, практически переходный процесс в такой катушке затухнет через 0,004 с.

Карточка № 6.3 (343)

Включение катушки индуктивности под постоянное напряжение

 <p> $U = 10 \text{ В};$ $R = 10 \text{ Ом};$ $L = 0,1 \text{ Гн}.$ </p> <p>Определите значение тока в цепи при $t = 0$ (при $t = 0$ замыкается контактор K).</p>	0	78
	1 А	77
	100 А	76
	0,1 А	75
<p>Определите принужденную составляющую тока.</p>	0	74
	1 А	73
	100 А	72
	0,1 А	71
<p>Определите постоянную времени цепи.</p>	1 с	70
	0,1 с	69
	0,01 с	68
	10 с	67
<p>Запишите общее выражение для тока в цепи.</p>	$i = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$	66
	$i = 1 + Ae^{0,01t}$	65
	$i = 1 + Ae^{-100t}$	64
	$i = 100e^{-\frac{t}{\tau}}$	63
<p>Найдите постоянную интегрирования A.</p>	$A = 10$	62
	$A = 1$	61
	$A = -1$	60
	$A = -10$	59

6.4. Включение катушки индуктивности под переменное напряжение

Исследуем переходный процесс в цепи, изображенной на рис. 6.4.

В момент времени $t = 0$ замыкается контактор K и катушка индуктивности (R , L) подключается к источнику переменного напряжения

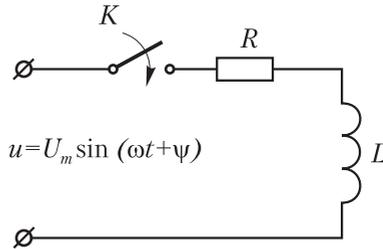


Рис. 6.4

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi),$$

где ψ — начальная фаза напряжения.

До замыкания контактора, при $t < 0$, ток в цепи равен нулю. Поскольку ток в цепи с индуктивностью не может измениться скачком, то в первый момент после замыкания контактора ток останется равным нулю: при $t = 0$ $i = 0$.

Будем искать решение в виде

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}.$$

Принужденную составляющую тока найдем на основании закона Ома для цепи переменного тока:

$$i_{\text{пр}} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$

Свободная составляющая тока $i_{\text{св}}$ находится из дифференциального уравнения второго закона Кирхгофа, если положить $u = 0$:

$$L \frac{di_{\text{св}}}{dt} + Ri_{\text{св}} = 0.$$

Решение этого уравнения найдено в предыдущем параграфе:

$$i_{\text{св}} = Ae^{-\frac{R}{L}t} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Следовательно, выражение для тока в рассматриваемой цепи при переходном режиме имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Постоянную интегрирования A определим на основании начального условия $i = 0$ при $t = 0$:

$$0 = I_m \sin(\psi - \varphi) + A,$$

откуда

$$A = -I_m \sin(\psi - \varphi).$$

Окончательно записываем:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi)e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Полученное выражение переходного тока позволяет оценить изменение характера переходного процесса при изменении условий включения или изменении параметров цепи.

На рис. 6.5 изображены кривые переходного тока i , его принужденной и свободной составляющих.

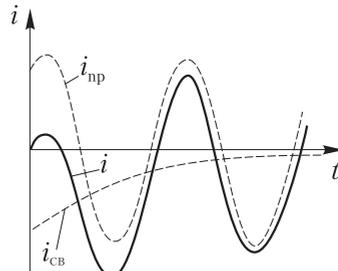


Рис. 6.5

Чем меньше индуктивность цепи L и больше ее активное сопротивление R , тем меньше τ и тем быстрее затухает свободная составляющая тока.

Кроме того, на характер переходного процесса существенное влияние оказывает начальная фаза напряжения ψ . При $\psi = \varphi$ свободная составляющая тока

$$i_{\text{св}} = -I_m \sin(\psi - \varphi)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

тождественно равна нулю и переходный процесс не возникает, в цепи сразу появляется установившийся режим.

Наибольший переходный ток будет в том случае, когда

$$\psi - \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

При этом условии выражение для тока приобретает вид

$$i = I_m \cos \omega t - I_m e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

График тока представлен на рис. 6.6. По истечении половины периода переходный ток достигает значения, близкого к удвоенному установившемуся значению, что следует учитывать при выборе предохранителей, контактов реле и других элементов электрической цепи.

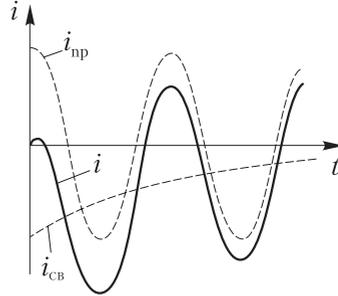
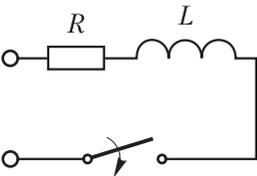


Рис 6.6

Карточка № 6.4 (246)

Включение катушки индуктивности под переменное напряжение

 <p> $R = 10 \text{ Ом};$ $L = 0,1 \text{ Гн};$ $\omega = 100 \text{ с}^{-1};$ $u = 10 \sin \omega t.$ </p> <p>Определите значение тока в цепи в момент замыкания контактора.</p>	$i(0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \omega t$	58
	$i(0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - 45^\circ)$	57
	$i(0) = 0$	56
	$i(0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - 90^\circ)$	55

Продолжение карт. № 6.4

Определите принужденную составляющую тока.	$i_{np} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \omega t$	54
	$i_{np} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin (\omega t - 45^\circ)$	53
	$i_{np} = 10 \sin \omega t$	52
	$i_{np} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin (\omega t - 90^\circ)$	51
Укажите выражение для свободной составляющей тока.	$i_{св} = 10 \sin \omega t$	50
	$i_{св} = A e^{-100t}$	49
	$i_{св} = 10 e^{-100t}$	48
	$i_{св} = A \sin \omega t$	47
Запишите общее выражение для тока в цепи.	$i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin (\omega t - 45^\circ) + A e^{-100t}$	46
	$i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin (\omega t - 45^\circ) - A e^{-100t}$	45
	$i = A e^{-100t}$	44
Найдите постоянную интегрирования A .	$A = -1$	43
	$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 45^\circ$	42
	$A = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin 45^\circ$	41

ГЛАВА 7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.1. Устройство электрических машин постоянного тока. Обратимость машин

По назначению электрические машины постоянного тока делятся на генераторы и двигатели.

Генераторы вырабатывают электрическую энергию, поступающую в энергосистему; двигатели создают механический вращающий момент на валу, который используется для привода различных механизмов и транспортных средств.

Электрические машины обратимы. Это значит, что одна и та же машина может работать и как генератор, и как двигатель. Поэтому можно говорить об устройстве машин постоянного тока, не рассматривая отдельно устройство генератора или двигателя.

Свойство обратимости не следует противопоставлять определенному назначению машины, которая обычно проектируется и используется либо как двигатель, либо как генератор. Значительно реже находят применение машины, предназначенные для работы как в генераторном, так и в двигательном режимах. Это так называемые стартер-генераторы, которые устанавливаются на некоторых подвижных объектах.

Генератор и двигатель отличаются расчетными и конструктивными особенностями. Поэтому использование двигателя в качестве генератора или генератора в качестве двигателя приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик машины, в частности к снижению коэффициента полезного действия.

В любой машине постоянного тока четко выделяются подвижная и неподвижная части. Подвижная (вращающаяся) часть машины называется *ротором*, неподвижная — *статором*.

Часть машины, в которой индуктируется электродвижущая сила, принято называть *якорем*, а часть машины, в которой создается магнитное поле возбуждения, — *индуктором*. Как правило, в машине постоянного тока статор служит индуктором, а ротор — якорем.

Статор машины постоянного тока называют также станиной. Станина изготавливается из магнитопроводящего материала (обычно литая сталь) и выполняет две функции, являясь, во-первых, магнитопроводом, по которому проходит магнитный поток возбуждения машины, и, во-вторых, основной конструктивной деталью, в которой размещаются все остальные детали. Изнутри к станине крепятся полюсы. Полюс машины состоит из сердечника, полюсного наконечника и катушки. При прохождении по катушкам постоянного тока в полюсах индуктируется магнитный поток возбуждения. Помимо главных полюсов в машинах повышенной мощности (более 1 кВт) устанавливаются дополнительные полюсы меньших размеров, предназначенные для улучшения работы машины. Катушки дополнительных полюсов включаются последовательно с обмоткой якоря.

Обмотка вращающегося якоря соединяется при помощи коллектора и щеток с неподвижными клеммами, через которые машина включается в электрическую сеть.

Сердечник якоря и коллектор крепятся на одном валу. Стальной вал якоря опирается на подшипники, закрепленные в боковых щитках машины. В свою очередь боковые щитки крепятся болтами к статору.

Для уменьшения вихревых токов и связанных с ними тепловых потерь сердечник якоря набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаковым покрытием. В теле якоря сверлят вентиляционные каналы, по которым проходит охлаждающий воздух. В пазы сердечника якоря укладывают проводники обмотки якоря, соединенные с коллекторными пластинами.

Коллектор набирают из медных пластин, разделенных миканитовыми прокладками. Поверхность медных пластин специально обрабатывают, чтобы повысить их устойчивость к истиранию.

Электрическое соединение вращающейся обмотки якоря с неподвижными клеммами машины осуществляется при помощи щеток, скользящих по коллектору.

Щетки вставляются в специальные обоймы щеткодержателя и прижимаются к коллектору спиральными или пластинчатыми пружинами. Щеткодержатели крепятся к траверсе, которую вместе со щетками можно поворачивать относительно статора на некоторый угол в ту или другую сторону.

В качестве основы для изготовления щетки используют графит. Чтобы получить заданные свойства (определенную электропроводность, повышенную сопротивляемость к истиранию), в щетку добавляют порошки металлов (медь, свинец).

На рис. 7.1 показан внешний вид машины постоянного тока серии П, выпускаемой отечественной промышленностью. Машины этой серии рассчитывают на различную мощность от 0,3 до 200 кВт. Двигатели серии П рассчитаны на напряжение 110 или 220 В, а генераторы — 115 или 230 В.

Поперечный разрез машины постоянного тока схематически изображен на рис. 7.2: 1 — сердечник якоря с проводниками обмотки; 2 — катушка обмотки возбуждения; 3 — вал; 4 — главный полюс; 5 — дополнительный полюс; 6 — статор. Между полюсным наконечником и якорем имеется воздушный

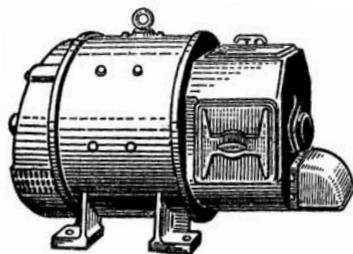


Рис. 7.1

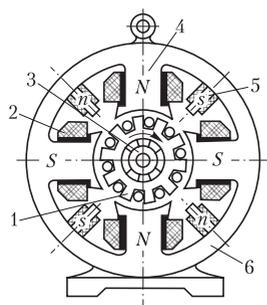


Рис. 7.2

зазор 1, исключая трение ротора 3 о статор 2 (рис. 7.3, а). Магнитная индукция в воздушном зазоре изменяется вдоль окружности якоря по закону, который называют трапецеидальным (рис. 7.3, б).

Устройство машины постоянного тока изображено на рис. 7.4. Цифрами обозначены: 1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — сердечник якоря; 4 — сердечник главного полюса; 5 — полюсная катушка; 6 — статор; 7 — подшипниковый щит; 8 — вен-

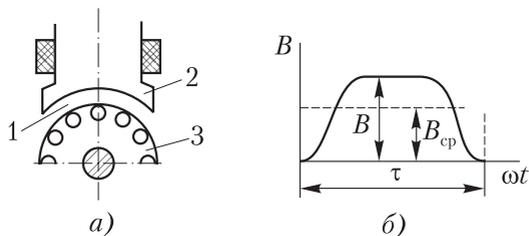


Рис. 7.3

тилятор; 9 — обмотка якоря.

Машины постоянного тока обычно имеют принудительное воздушное охлаждение, осуществляемое вентилятором, насаженным на вал якоря. Для мощных машин разработаны системы водородного, а также водяного охлаждения.

Для защиты машины от пыли и влаги конструктивные окна, обеспечивающие доступ к коллектору и щеткам, обычно закрывают съемными стальными лентами или пластинами.

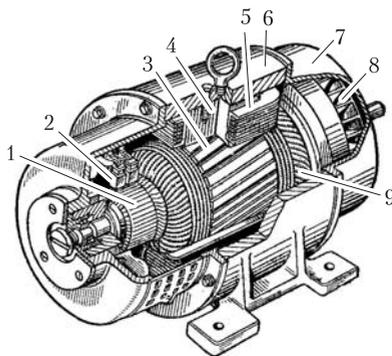


Рис. 7.4

Карточка № 7.1 (281)

Устройство электрических машин постоянного тока.

Обратимость машин

Укажите основные конструктивные детали машины постоянного тока.	Индуктор, якорь, коллектор, вентилятор	167
	Индуктор, якорь, коллектор, щетки	272
	Статор, главные полюсы, дополнительные полюсы, якорь, коллектор, щетки	45

Продолжение карт. № 7.1

Что называется якорем?	Вращающаяся часть машин	134
	Часть машины, в которой индуцируется ЭДС	36
Почему сердечник вращающегося якоря набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга?	Из конструктивных соображений	9
	Для уменьшения магнитного сопротивления потоку возбуждения	60
	Для уменьшения тепловых потерь в машине	271
На заводском щитке машины серии П указано ее номинальное напряжение 220 В. Какая это машина?	Двигатель постоянного тока	34
	Генератор постоянного тока	246
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	88
С какой целью применяют принудительное охлаждение машины постоянного тока?	Во избежание перегрева машин	280
	Для уменьшения потерь энергии в машине	26
	Для уменьшения размера и веса машины	268

7.2. Принцип работы машины постоянного тока

Для понимания сущности работы электрической машины необходимо вспомнить физические законы, которыми описываются основные электромагнитные явления: закон электромагнитной индукции, закон Био — Савара, закон Ампера. Эти законы вместе с законами Кирхгофа и Ома позволяют описать основные процессы, происходящие в электрических машинах.

Работа любой электрической машины (генератора или двигателя постоянного и переменного тока) характеризуется взаимодействием двух направленных навстречу друг другу вращающихся моментов, один из которых создается

механическими, а другой — электромагнитными силами. С другой стороны, работа двигателя и генератора характеризуется равновесием напряжения сети и ЭДС, возникающей в обмотке якоря (с учетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины).

Принцип работы генератора постоянного тока. В генераторе энергия механического движения преобразуется в электрическую энергию. Двигатель, в качестве которого обычно используется гидротурбина, газовая турбина или двигатель внутреннего сгорания, вращает якорь в магнитном поле возбуждения. Вследствие этого вращения изменяется магнитный поток, пронизывающий витки обмотки якоря. При этом индуктируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока:

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt},$$

где ω — число витков, пронизываемых изменяющимся магнитным потоком Φ ; $d\Phi/dt$ — производная магнитного потока по времени, или скорость изменения магнитного потока.

Приведенная формула, выражающая закон электромагнитной индукции, показывает, что для индуктирования постоянной ЭДС E необходимо равномерно (с постоянной скоростью) увеличивать или уменьшать магнитный поток Φ . Однако равномерное увеличение или уменьшение магнитного потока в течение длительного времени технически невозможно осуществить. Поэтому получение постоянной ЭДС в устройствах, основанных на законе электромагнитной индукции, невозможно*.

В реальном генераторе постоянного тока магнитный поток, пронизывающий каждый виток обмотки якоря, в течение первой половины периода увеличивается, а в течение второй половины периода уменьшается. Соответственно изменяется и ЭДС в каждом витке обмотки по величине и направлению.

Для получения постоянной ЭДС используют различные выпрямители, в частности, генератор постоянного тока снабжается механическим выпрямителем — коллектором. Коллектор автоматически переключает концы витков обмотки при изменении направления ЭДС.

* Высокоскоростные униполярные машины позволяют получить постоянную ЭДС порядка нескольких вольт. Однако теоретически такие машины следует рассматривать как генераторы переменного тока, имеющие коллектор с бесконечно большим числом пластин.

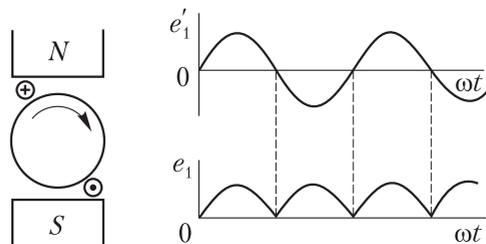


Рис. 7.5

На рис. 7.5 изображена синусоидальная ЭДС e'_1 , которая индуцируется в одном витке обмотки якоря. С помощью коллектора эта ЭДС преобразуется в пульсирующую ЭДС e_1 .

Возьмем для рассмотрения второй виток обмотки генератора, сдвинутый относительно первого на угол 90° . Индуцируемая во втором витке ЭДС e'_2 будет опережать по фазе на 90° ЭДС e'_1 .

Вид e'_1, e'_2 а также выпрямленных ЭДС e_1 и e_2 показан на рис. 7.6.

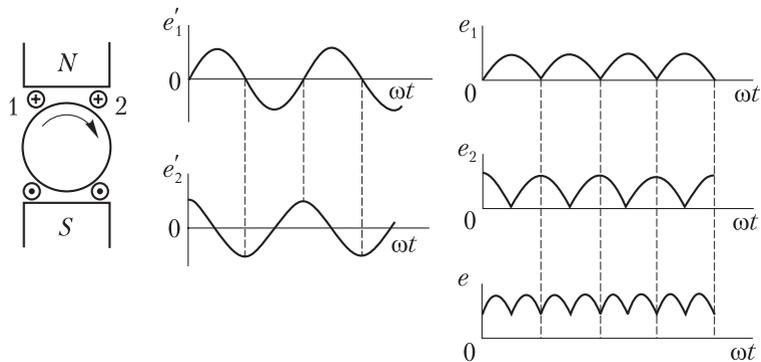


Рис. 7.6

К выходным зажимам генератора подводится ЭДС e , равная сумме ЭДС e_1 и e_2 . Из рис. 7.6 очевидно, что результирующая ЭДС e имеет значительно меньшие пульсации, чем ЭДС e_1 и e_2 . При большом числе витков, сдвинутых по окружности якоря на небольшие углы, пульсации результирующей ЭДС на зажимах генератора становятся пренеб-

режимом малыми. В этом случае машина вырабатывает напряжение, практически постоянное по величине и направлению.

Для повышения уровня вырабатываемой ЭДС поверх первого ряда витков обмотки могут быть уложены без смещения (в те же самые пазы якоря) второй и последующие ряды витков.

При разомкнутых выходных зажимах генератора ток в обмотке якоря равен нулю. При этом генератор работает вхолостую, а приводной двигатель преодолевает только моменты трения, затрачивая минимальную механическую энергию. При подключении к генератору электрической нагрузки по обмотке якоря начинает протекать ток.

Проводники обмотки находятся в магнитном поле. В соответствии с законом Ампера возникают механические силы, направление которых определяется правилом левой руки. Нетрудно убедиться, что эти силы создают вращающий момент, направленный противоположно моменту приводного двигателя.

Чем больше мощность потребителей электрической энергии, подключенных к генератору, тем больше ток в обмотке якоря, тем больше силы, препятствующие его вращению. Соответственно увеличиваются и затраты механической энергии на вращение якоря генератора.

Принцип работы двигателя постоянного тока. Если подключить машину постоянного тока к электрической сети, через обмотку якоря потечет ток. В соответствии с законом Ампера, на проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле возбуждения, будут действовать механические силы.

Эти силы создадут вращающий момент, под действием которого якорь будет раскручиваться.

Вращающийся вал якоря используется для привода в действие различных механизмов: подъемных и транспортных средств, станков, швейных машин и т.д.

Исходя из закона сохранения энергии можно сказать, что мощность, потребляемая двигателем из сети, тем больше, чем больше механическая нагрузка на его валу. Однако для понимания сущности работы электрического двигателя важно проследить, каким образом изменение механической нагрузки сказывается на величине электрической мощности, потребляемой двигателем.

Разберемся в этом. Обмотка якоря двигателя вращается в магнитном поле возбуждения. Но в этих условиях в соот-

ветствии с законом электромагнитной индукции в обмотке якоря возникает ЭДС. Применяя правило правой руки, нетрудно установить, что она направлена навстречу приложенному напряжению сети. Поэтому ее назвали противо-ЭДС. Именно противо-ЭДС является фактором, регулирующим потребление электрической мощности из сети.

По закону электромагнитной индукции противо-ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки якоря. Следовательно, с уменьшением скорости вращения якоря уменьшается и противо-ЭДС.

Если механическая нагрузка на валу двигателя отсутствует (двигатель работает вхолостую), вращающему моменту двигателя препятствуют только моменты трения и скорость вращения якоря достигает максимального значения. При этом противо-ЭДС почти полностью компенсирует напряжение сети и через обмотку якоря протекает минимальный ток. Соответственно электрическая мощность, потребляемая из сети, минимальна.

При подключении механической нагрузки скорость вращения якоря уменьшится, уменьшится и величина противо-ЭДС. Ток и электрическая мощность, потребляемые двигателем из сети, возрастут.

Можно сказать, что противо-ЭДС в двигателе играет роль дросселя, регулирующего поступление мощности из сети.

Карточка № 7.2 (183)

Принцип работы машины постоянного тока

Укажите строку, в которой приведены формулы закона электромагнитной индукции.	$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}; F = IlB$	153
	$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}; e = Blv$	201
	$\Phi = BS; F = IlB$	192

Продолжение карт. № 7.2

Как должен изменяться магнитный поток, сцепленный с витком, чтобы в витке индуцировалась постоянная по величине ЭДС?	Оставаться неизменным	203
	Изменяться по синусоидальному закону	21
	Равномерно (линейно) увеличиваться или уменьшаться	163
Какая ЭДС индуцируется в витках обмотки якоря генератора постоянного тока?	Постоянная по величине и направлению	195
	Переменная	133
Витки обмотки якоря соединены последовательно. За счет чего могут быть уменьшены пульсации результирующей ЭДС на зажимах генератора?	Увеличения числа витков	235
	Равномерного распределения витков по окружности якоря	109
	Увеличения числа витков и их равномерного распределения по окружности якоря	137
Ток, отдаваемый генератором в сеть, увеличился. Как изменился вращающий момент на валу генератора?	Не изменился	97
	Увеличился	149
	Уменьшился	33

Карточка № 7.3 (231)

Принцип работы машины постоянного тока

Укажите формулу закона Ампера.	$E = Blv$	223
	$B = \Phi/S$	188
	$F = IlB$	185
	$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}$	66

Продолжение карт. № 7.3

При неизменном магнитном потоке возбуждения ток в обмотке якоря увеличился. Как изменился вращающий момент двигателя?	Не изменился	224
	Увеличился	226
	Уменьшился	266
Механическая нагрузка на валу двигателя увеличилась. Как изменилась скорость вращения якоря?	Не изменилась	123
	Увеличилась	128
	Уменьшилась	41
Скорость вращения двигателя уменьшилась. Как изменилась ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря?	Не изменилась	42
	Увеличилась	58
	Уменьшилась	7
	В двигателе ЭДС не индуцируется	43
ЭДС в обмотке якоря двигателя уменьшилась. Как изменились ток якоря и мощность, потребляемая из сети?	Ток и мощность увеличилась	282
	Ток увеличился, мощность уменьшилась	6
	Ток и мощность уменьшились	250
	Ток уменьшился, мощность увеличилась	168

7.3. Понятие об обмотке якоря. Коллектор и его назначение

Основным элементом обмотки якоря является секция — часть обмотки, подсоединенная к двум коллекторным пластинам, которые следуют друг за другом по схеме обмотки (рис. 7.7).

Секция может состоять из одного или нескольких витков. Активные стороны секции располагаются под разно-

именными полюсами на расстоянии полюсного деления друг от друга (полюсным делением называют часть длины окружности якоря, приходящуюся на один полюс). При этом ЭДС, индуцируемые в активных сторонах секции, суммируются.

В современных машинах постоянного тока применяются двухслойные обмотки якоря, в каждом пазу которого укладываются две активные стороны двух различных секций. Очевидно, что в этом случае число пазов равно числу секций.

Для уменьшения пульсаций ЭДС секции обмотки соединяются последовательно: к коллекторной пластине припаиваются конец одной секции и начало следующей. Таким образом, число коллекторных пластин также оказывается равным числу секций.

При проектировании и расчете обмоток якорей используют следующие понятия:

первый частичный шаг y_1 (ширина секции) — число пазов, расположенных между активными сторонами секции;

второй частичный шаг y_2 — число пазов между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции;

результрующий шаг y — число пазов между начальными сторонами двух последовательно соединенных секций;

шаг обмотки по коллектору y_k — число коллекторных пластин между началом и концом секции по ходу обмотки.

В зависимости от формы секции различают петлевые и волновые обмотки.

В петлевой обмотке секция имеет форму петли, а начало и конец секции припаяны к двум соседним коллекторным пластинам (рис. 7.8).

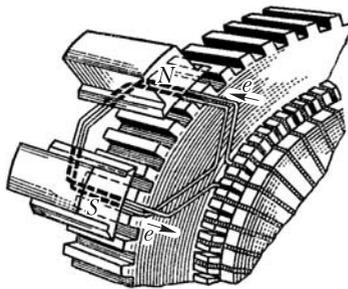


Рис. 7.7

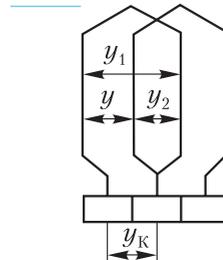


Рис. 7.8

Расчет простой петлевой двухслойной обмотки осуществляется по следующим формулам:

$$y_1 = \frac{z}{2p} \pm b;$$

$$y = y_k = 1;$$

$$y_2 = y_1 - y.$$

Здесь z — число пазов якоря; p — число пар полюсов машины; b — дробь, которую отнимают или добавляют к значению y , чтобы оно стало целым числом.

Схематическое изображение одного из вариантов простой петлевой двухслойной обмотки приведено на рис. 7.9, *a* (радиальная схема). Очевидно, что группы секций образуют параллельные ветви, число которых равно числу полюсов машины (рис. 7.9, *b* — развертка обмотки, рис. 7.9, *в* — схема параллельных ветвей). Такое соответствие не случайно: в простой петлевой обмотке число пар параллельных ветвей a равно числу пар полюсов p . Наличие параллельных ветвей позволяет уменьшить токовые нагрузки на щетки, что очень важно, так как коллекторно-щеточный контакт — самый уязвимый и ненадежный элемент электрической машины постоянного тока.

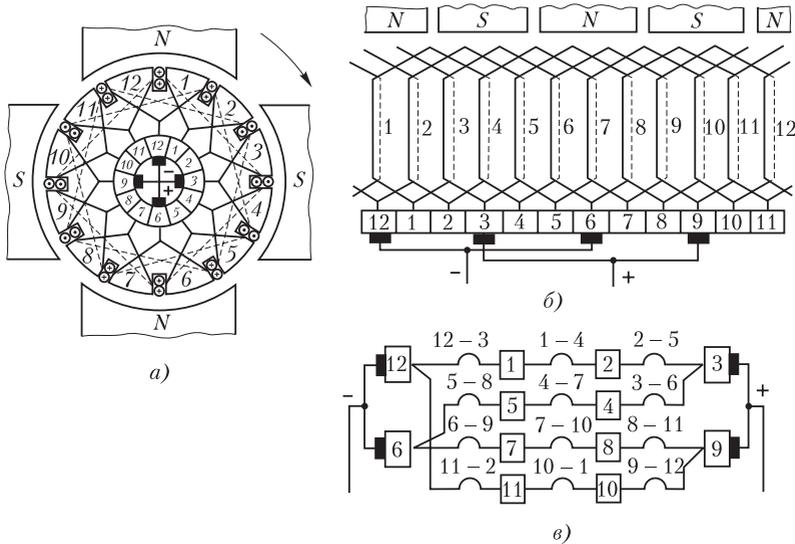


Рис. 7.9

В волновой обмотке секция по форме напоминает волну (рис. 7.10).

Расчет простой волновой двухслойной обмотки осуществляется по формулам:

$$y_1 = \frac{z}{2p} \pm b;$$

$$y = y_k = \frac{k \pm 1}{p};$$

$$y_2 = y - y_1.$$

Здесь k — число коллекторных пластин.

Схематическое изображение простой волновой двухслойной обмотки приведено на рис. 7.11 (рис. 7.11, а — радиальная схема; рис. 7.11, б — развертка обмотки). Простая волновая обмотка всегда имеет одну пару параллельных ветвей.

Волновую обмотку, в которой половина* секций всегда соединена последовательно, применяют в электрических машинах, рассчитанных на высокие напряжения.

В машинах, рассчитанных на сильные токи, применяют петлевые обмотки с большим числом пар параллельных ветвей.

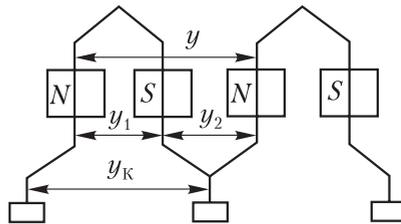


Рис. 7.10

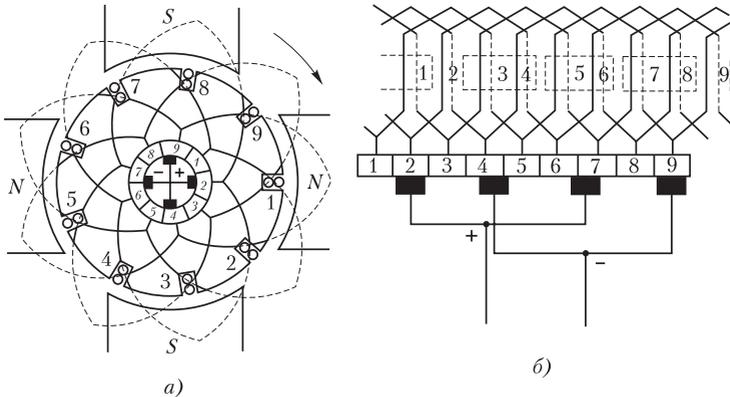


Рис. 7.11

*За вычетом небольшого числа секций, замыкаемых накоротко щеточным контактом.

Для увеличения числа пар параллельных ветвей разрабатаны схемы сложных петлевых и волновых обмоток, состоящих из двух или нескольких простых обмоток.

Токи, индуцируемые в якорной обмотке, подводятся к потребителю электрической энергии через щеточно-коллекторный узел. Коллектор машины постоянного тока является самой ответственной в эксплуатации деталью, так как его скользящий контакт требует постоянного наблюдения и ухода, очистки от пыли, нагара и грязи, поддержания оптимального давления между трущимися поверхностями. Кроме того, коллектор является механическим выпрямителем переменного тока, который периодически меняет направление тока в каждой секции, сохраняя постоянство направления тока во внешней цепи.

Карточка № 7.4 (249)

Понятие об обмотке якоря. Коллектор и его назначение

Якорь имеет 12 пазов. Обмотка якоря двухслойная. Определите: а) число секций в обмотке; б) число пластин коллектора.	Для ответа на вопросы недостаточно данных: неизвестно число полюсов машины	230
	а) 12; б) 12	252
	а) 6; б) 12	96
	а) 6; б) 6	11
Якорь четырехполюсной машины имеет 12 пазов и простую петлевую двухслойную обмотку. Определите: а) ширину секции; б) шаг по коллектору.	а) 12; б) 12	63
	а) 3; б) 1	138
	а) 3; б) 3	111
Якорь четырехполюсной машины имеет 9 пазов и простую волновую двухслойную обмотку. Определите: а) ширину секции; б) шаг по коллектору.	Задача не определена, так как неизвестно число коллекторных пластин	262
	а) 2; б) 2	27
	а) 2; б) 4	67
	а) 4; б) 1	117

Продолжение карт. № 7.4

В каких машинах применяются обмотки: а) петлевые; б) волновые?	а) Высоковольтных; б) сильноточных	238
	а) Сильноточных; б) высоковольтных	211
	а) Генераторах; б) двигателях	210
	а) Двигателях; б) генераторах	199
Каково основное назначение коллектора?	Крепление обмотки якоря	244
	Электрическое соединение вращающейся обмотки якоря с непо движными клеммами машины	101
	Выпрямление переменного тока в секциях обмотки	281

7.4. ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря

Приведенные ранее формулировки закона электромагнитной индукции неудобны для практики, так как выражают ЭДС через переменные физические величины, которые сравнительно трудно рассчитать и измерить (скорость изменения магнитного потока, скорость пересечения силовых линий, магнитная индукция). Поэтому, применяя логические рассуждения и известные зависимости, ЭДС генератора выражают через магнитный поток возбуждения и скорость вращения машины.

Как указывалось, магнитная индукция распределена по окружности якоря неравномерно (трапецеидальный закон распределения), что вызывает пульсации ЭДС в каждой секции. Однако при суммировании ЭДС большого числа секций обмотки якоря пульсации сглаживаются, и на зажимах машины ЭДС имеет постоянное усредненное значение. Поэтому реальное магнитное поле машины можно заменить равномерным с одинаковым средним значением магнитной индукции по всей боковой поверхности якоря.

Среднее значение магнитной индукции равно отношению магнитного потока полюса к площади, которую он пронизывает:

$$B_{\text{cp}} = \Phi / (\tau l)$$

Здесь τ — полюсное деление; l — длина якоря, равная активной длине секции обмотки.

Вводя обозначение

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

(где D — диаметр якоря), получим

$$B_{\text{cp}} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D}{2p} l} = \frac{2p\Phi}{\pi D l}.$$

Среднее значение ЭДС, индуцируемой в одном активном проводнике обмотки, определим по формуле закона электромагнитной индукции:

$$E_1 = B_{\text{cp}} l v.$$

Следовательно,

$$E_1 = \frac{2p\Phi}{\pi D l} l v = \frac{2p\Phi}{\pi D} v.$$

Линейная скорость движения проводников обмотки якоря в метрах на секунду определяется по известной формуле

$$v = \frac{\pi D n}{60},$$

где D — диаметр якоря, м; n — скорость вращения якоря, об/мин.

После подстановки находим

$$E_1 = \frac{2p\Phi}{\pi D} \frac{\pi D n}{60} = \frac{2p\Phi n}{60}.$$

ЭДС генератора равна сумме ЭДС последовательно соединенных проводников, число которых равно числу всех проводников обмотки N , деленному на число параллельных ветвей $2a$:

$$E = E_1 \frac{N}{2a} = \frac{2p\Phi n}{60} \frac{N}{2a} = \frac{p}{60} \frac{N}{a} \Phi n.$$

Величину $\frac{p}{60} \frac{N}{a}$ обозначают c_E и называют постоянной генератора. Таким образом,

$$E = c_E \Phi n,$$

т.е. ЭДС генератора постоянного тока прямо пропорциональна скорости вращения якоря и магнитному потоку возбуждения.

Карточка № 7.5 (237)

ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря

В четырехполюсной машине длина окружности якоря $\pi D = 40$ см, активная длина проводника обмотки якоря 10 см, магнитный поток возбуждения $0,01 \text{ В} \cdot \text{с} = 0,01 \text{ Вб}$. Определите среднее значение магнитной индукции.	$B_{\text{cp}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Тл}$	228
	$B_{\text{cp}} = 0,01 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 0,01 \text{ Тл}$	150
	$B_{\text{cp}} = 0,0001 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 0,0001 \text{ Тл}$	179
	$B_{\text{cp}} = 2 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 2 \text{ Тл}$	120
В условиях предыдущей задачи линейная скорость проводников обмотки якоря 10 м/с. Определите ЭДС, индуцируемую в одном проводнике.	$E = 0,1 \text{ В}$	35
	$E = 100 \text{ В}$	68
	$E = 1 \text{ В}$	189
В пазах якоря рассматриваемой машины уложено 460 проводников простой петлевой обмотки. Определите ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря.	Задача не определена, так как неизвестно число пар параллельных ветвей обмотки якоря	10
	$E = 460 \text{ В}$	28
	$E = 230 \text{ В}$	143
	$E = 115 \text{ В}$	261

Продолжение карт. № 7.5

Рассмотренная выше машина работает в качестве генератора. Определите постоянную генератора.	Задача не определена	172
	$c_E = 460/60$	5
Скорость вращения якоря рассматриваемой машины $n = 1500$ об/мин. Определите ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря.	$E = 100$ В	58
	$E = 115$ В	54
	$E = 230$ В	186

7.5. Реакция якоря

В режиме холостого хода магнитное поле машины создается только обмоткой возбуждения (рис. 7.12, *а*). При подключении нагрузки через обмотку якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле (рис. 7.12, *б*).

На рисунках кружками показаны сечения проводников обмотки возбуждения и обмотки якоря. Ток в проводнике, текущий за плоскость рисунка, помечен кружком с крестиком, а ток, направленный «к нам», кружком с точкой. Направления магнитных силовых линий определены по правилу правоугольного винта.

Реально существующее в нагруженной машине магнитное поле следует рассматривать как результат наложения магнитных полей обмотки возбуждения и обмотки якоря (рис. 7.12, *в*).

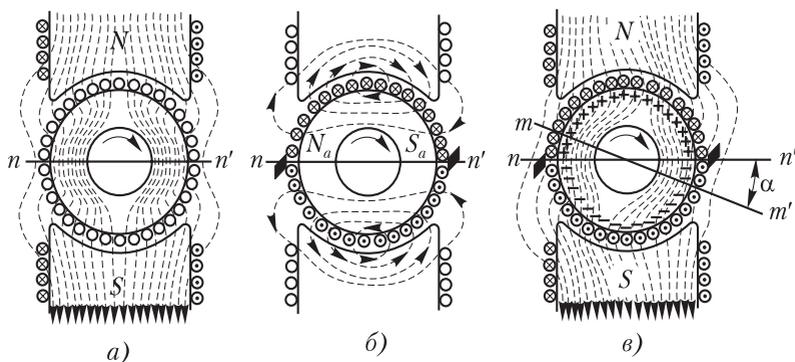


Рис. 7.12

Таким образом, магнитное поле машины, в котором движутся проводники обмотки якоря, создается не только обмоткой возбуждения, но и обмоткой якоря. При этом поле возбуждения стабильно, а поле якоря изменяется при изменении нагрузки машины.

Влияние магнитного поля якоря на поле возбуждения машины называется *реакцией якоря*.

Вследствие реакции якоря (см. рис. 7.12, в) симметрия магнитного поля машины нарушается. Происходит усиление магнитного потока под сбегающим краем полюса генератора и ослабление — под набегающим краем (якорь генератора вращается по часовой стрелке, следовательно, левый край северного полюса и правый край южного полюса «набегают» на якорь).

Вследствие насыщения участков магнитной цепи усиление магнитного потока под одним краем полюса оказывается относительно меньшим, чем ослабление магнитного потока под другим краем. Это приводит к тому, что среднее значение магнитного потока в нагруженной машине становится меньше, чем в ненагруженной. Соответственно уменьшается и величина ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря.

Назовем *геометрической нейтралью* воображаемую линию, которая проходит строго посередине между полюсами и лежит в плоскости, разделяющей магнитную систему машины на две симметричные части. Аналогичную линию, проходящую через диаметрально противоположные точки окружности якоря, в которых магнитная индукция равна нулю, назовем *физической нейтралью*. Магнитная индукция равна нулю в тех точках, где магнитные силовые линии касаются окружности якоря (не входя в него), а физическая нейтраль перпендикулярна магнитным силовым линиям.

В ненагруженной машине физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В нагруженном генераторе, как очевидно на рис. 7.12, в, физическая нейтраль mm' поворачивается относительно геометрической нейтрали nn' на угол α в сторону вращения якоря.

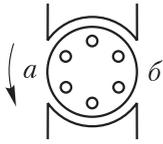
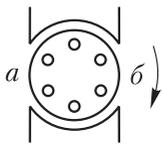
Мысленно представим себе, что на рис. 7.12 изображен не генератор, а двигатель. Тогда при тех же направлениях токов в обмотках якоря и возбуждения ротор двигателя начал бы вращаться в другую сторону (против часовой стрел-

ки), в чем нетрудно убедиться, применив правило левой руки. Правый край северного полюса и левый край южного полюса стали бы набегающими.

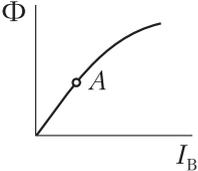
Следовательно, в нагруженном двигателе магнитный поток усиливается под набегающим краем полюса и ослабляется под сбегающим краем, а физическая нейтраль поворачивается на угол α против вращения якоря.

Карточка № 7.6 (313)

Реакция якоря

 <p>Якорь нагруженного генератора вращается против часовой стрелки. В какой из точек (a или b) результирующее магнитное поле слабее?</p>	В точке a	24
	В точке b	180
	Ответить нельзя, так как не обозначена полярность полюсов машины	219
	Магнитное поле в обеих точках одинаково	191
 <p>Якорь нагруженного двигателя вращается по часовой стрелке. В какой из точек (a или b) результирующее магнитное поле слабее?</p>	В точке a	169
	В точке b	142
	Ответить нельзя, так как не обозначена полярность полюсов машины	222
<p>Как повернута физическая нейтраль относительно геометрической в машине, рассмотренной:</p> <p>а) в первой задаче; б) во второй задаче?</p>	а) По часовой стрелке; б) против часовой стрелки	116
	а) Против часовой стрелки; б) по часовой стрелке	248
	В обоих случаях против часовой стрелки	247
	В обоих случаях по часовой стрелке	8

Продолжение карт. № 7.6

 <p>Режим работы генератора соответствует точке <i>A</i>, выбранной на линейном участке характеристики намагничивания машины. Каким будет результирующее магнитное поле вследствие реакции якоря?</p>	Уменьшится и будет искажено	151
	Будет искажено, но не изменится по величине	175
Какое явление называют реакцией якоря?	Уменьшение магнитного поля машины при увеличении нагрузки	78
	Искажение магнитного поля машины при увеличении нагрузки	39
	Уменьшение ЭДС обмотки якоря при увеличении нагрузки	40
	Воздействие магнитного поля якоря на основное магнитное поле полюсов	69

7.6. Коммутация и способы ее улучшения. Дополнительные полюсы

Как отмечалось, замкнутая схема обмотки якоря разделяется щетками на две параллельные ветви или на несколько пар параллельных ветвей. На рис. 7.9 указаны номера секций, которые входят в ту или иную параллельную ветвь. Однако на рисунке показано некоторое определенное (начальное) положение обмотки. При работе машины обмотка вращается относительно неподвижных щеток, поэтому секции обмотки непрерывно переходят из одной параллельной ветви в другую.

Рассмотрим этот процесс более подробно. На рис. 7.13 коллекторные пластины с припаянной к ним секцией обмотки перемещаются слева направо относительно неподвижной щетки. При переходе с первой коллекторной пластины на вторую секция обмотки якоря переключается из одной параллельной ветви в другую. В процессе переключения секция замыкается щеткой накоротко, а ток в секции изменяет свое направление на противоположное.

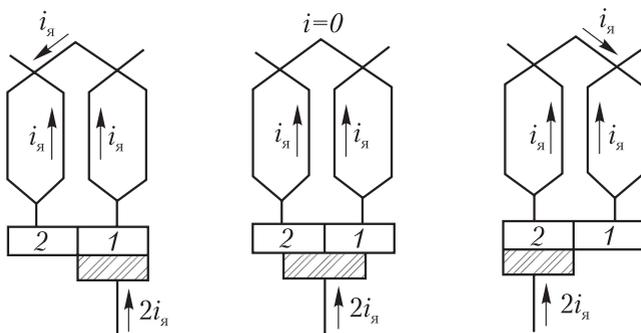


Рис. 7.13

Процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с ним явления в короткозамкнутых секциях называют *коммутацией* машины. Время, в течение которого секция обмотки накоротко замкнута щеткой, называется *периодом коммутации* T .

В процессе коммутации сопротивление щеточного контакта, пропорциональное площади соприкосновения щетки с коллекторной пластиной (F), и ток в короткозамкнутой секции изменяются в течение периода коммутации по линейному закону (рис. 7.14). При прямолинейной коммутации плотность тока в щеточном контакте постоянна, что обеспечивает оптимальные условия работы коллектора.

Однако влияние ЭДС самоиндукции и ЭДС, индуцируемой в короткозамкнутой секции магнитным потоком якоря, приводит к криволинейной коммутации, при которой в течение некоторой части периода плотность тока под щеткой резко возрастает. Возрастание плотности тока вызывает повышенное искрение под щетками и разрушение коллектора. Для получения прямолинейной коммутации необходимо скомпенсировать магнитные поля, в которых находится короткозамкнутая секция обмотки якоря.

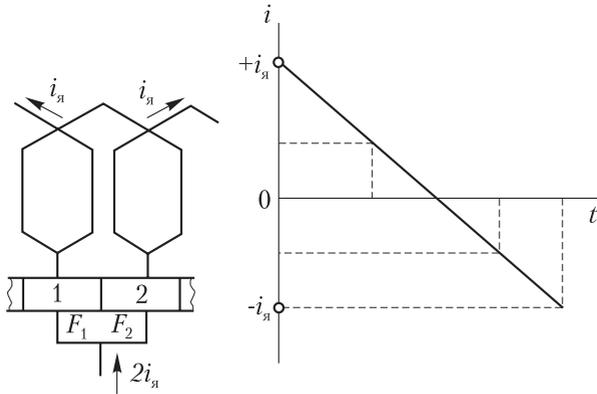


Рис. 7.14

Самый простой способ улучшения коммутации — сместить щетки с геометрической нейтрали. Однако он пригоден только для машин, работающих при постоянной нагрузке. Действительно, при изменении нагрузки изменится угол α поворота физической нейтрали относительно геометрической и регулировка коммутации нарушится. Поэтому в современных машинах постоянного тока применяется другой способ компенсации магнитных полей в области вращения короткозамкнутых секций обмотки якоря. При этом щетки размещаются на геометрической нейтрали, а между главными полюсами машины устанавливаются дополнительные полюсы, обмотки которых включаются последовательно с обмоткой якоря (рис. 7.15). Магнитный поток дополнительных полюсов пропорционален току нагрузки, и компенсация достигается при всех режимах работы машины. На рис. 7.16, *a*, *б* условно показано размещение дополнительных полюсов в двигателе (*a*) и генераторе (*б*).

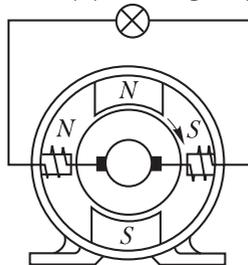


Рис. 7.15

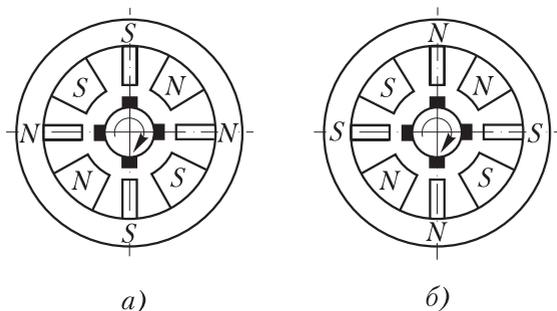


Рис. 7.16

Помимо электрических причин существенное влияние на коммутацию оказывают механические дефекты: неправильный выбор щеточных пружин, отклонение формы коллектора от цилиндрической, загрязнение поверхности коллектора, плохое прилегание щеток к коллектору. Поэтому в процессе эксплуатации машины необходимо тщательно следить за щеточно-коллекторным узлом и обнаруженные дефекты немедленно устранить: очистить коллектор от грязи и угольной пыли, заменить и притереть щетки, проточить коллектор на токарном станке и т.д. Наконец, существенное влияние на коммутацию оказывает величина сопротивления щеток. Практически полная компенсация магнитных полей в короткозамкнутой секции невозможна, поэтому малые ЭДС в этой секции все-таки наводятся. Чтобы ограничить токи, вызываемые этими ЭДС, величину сопротивления щетки выбирают достаточно большой. Однако не следует забывать, что через щетку протекает ток нагрузки и увеличение сопротивления щетки приводит к возрастанию потерь напряжения внутри машины.

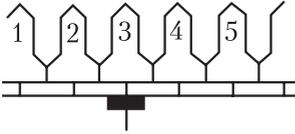
При учете всех этих факторов наиболее приемлемыми оказываются металлографитовые щетки.

Несмотря на все предупредительные меры, полностью устранить искрение под щетками обычно не удается. По-этому правилами эксплуатации допускается слабое точечное искрение под небольшой частью поверхности щетки.

Особенно опасен для машины «круговой огонь» по коллектору. Значительное увеличение искрения под щетками приводит к подгоранию коллектора, что еще более увеличивает искрение. В результате возникает дуговой разряд, обмотка машины замыкается накоротко, а ток в обмотке якоря становится недопустимо большим. Возникновение «кругового огня» является аварийным режимом.

Карточка № 7.7 (305)

Коммутация и способы ее улучшения. Дополнительные полюсы

<p>Какая секция коммутируется в рассматриваемый момент времени?</p> 	Секция 2	86
	Секция 3	65
	Секция 4	98
	Определить невозможно	276
<p>Пластины коллектора движутся относительно щеток с линейной скоростью 25 м/с. Ширина щетки 1 см. Определите время, в течение которого совершается процесс коммутации одной секции.</p>	Для решения задачи недостаточно данных	125
	0,0004 с	148
	0,04 с	4
	0,0002 с	49
<p>Прямолинейную коммутацию иногда получают за счет смещения щеток с геометрической нейтрали. Каков основной недостаток этого способа?</p>	Сложность определения физической нейтрали машины	200
	Зависимость угла поворота щеток от величины нагрузки	256
<p>Какой способ улучшения коммутации целесообразно использовать в мощных машинах при переменной нагрузке?</p>	Смещение щеток с геометрической нейтрали	164
	Установка дополнительных полюсов	51
<p>Чем ограничивается сопротивление щетки машины постоянного тока: а) минимально допустимое; б) максимально допустимое?</p>	а) Ничем; б) потерями напряжения в щеточном контакте	227
	а) Потерями напряжения в щеточном контакте; б) током в короткозамкнутой секции обмотки якоря	73
	а) Током в короткозамкнутой секции; б) потерями напряжения в щеточном контакте	85

7.7. Генератор постоянного тока независимого возбуждения

Различают генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением. В генераторах независимого возбуждения основной магнитный поток создается либо постоянным магнитом, либо электромагнитом (обмоткой возбуждения), питаемым от источника постоянного тока.

Схема генератора постоянного тока независимого возбуждения изображена на рис. 7.17. Важнейшая особенность этой схемы — независимость тока возбуждения и магнитного потока главных полюсов от нагрузки генератора.

Физические величины, характеризующие работу электрической машины, связаны между собой определенными зависимостями, которые называются *характеристиками*.

Рассмотрим основные характеристики генератора независимого возбуждения.

Характеристикой холостого хода называется зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при постоянной скорости вращения якоря и отключенной нагрузке:

$$E = f(I_B) \quad (\text{при } I = 0 \text{ и } n = \text{const}).$$

Ее обычно снимают при номинальной скорости вращения генератора.

Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения (рис. 7.18) представляет собой изображенную в другом масштабе часть петли гистерезиса магнитной системы генератора. Поскольку ЭДС пропорциональна магнитной индукции, а напряженность магнитного поля — току возбуждения, зависимость $E(I_B)$ имеет такой же вид, как зависимость $B(H)$. Таким образом, характеристика холостого хода отображает свойства магнитопровода. Пос-

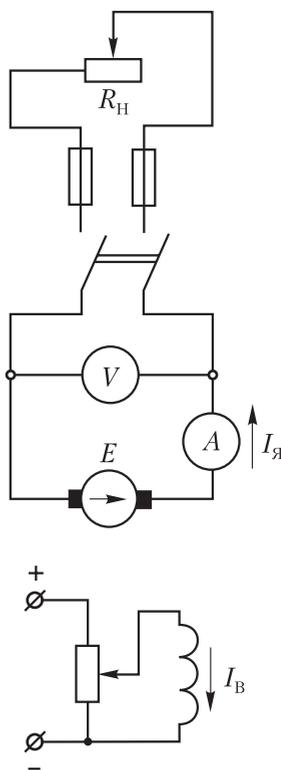


Рис. 7.17

кольку после первоначального намагничивания коэрцитивная сила удерживает в магнитопроводе небольшой остаточный магнитный поток, ЭДС генератора не равна нулю при токе возбуждения, равном нулю. Эту ЭДС называют *остаточной*:

$$E_0 = E \quad (\text{при } I_{\text{в}} = 0).$$

Изгиб характеристики холостого хода объясняется насыщением магнитопровода. Номинальный ток возбуждения выбирают таким, чтобы он соответствовал участку перегиба характеристики холостого хода.

При этом наилучшим образом используется свойство магнитопровода усиливать магнитный поток обмоток возбуждения.

Характеристика холостого хода может быть рассчитана теоретически и снята экспериментально. В последнем случае ЭДС измеряется вольтметром, подключенным к зажимам генератора.

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянной скорости вращения и постоянном сопротивлении цепи возбуждения:

$$U = f(I) \quad (\text{при } n = \text{const и } R_{\text{в}} = \text{const}).$$

При отсутствии размагничивающего действия реакции якоря внешняя характеристика описывается уравнением

$$U = E - IR_{\text{я}},$$

представляющим собой прямую линию 1 в плоскости координатных осей U, I (рис. 7.19). При насыщении магнитной системы и наличия размагничивающего действия реакции якоря с увеличением нагрузки ЭДС генератора уменьшается, поэтому напряжение генератора снижается быстрее, чем по закону прямой линии (кривая 2 на рис. 7.19).

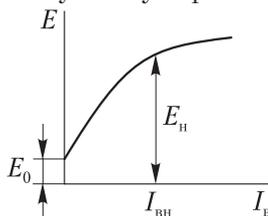


Рис. 7.18

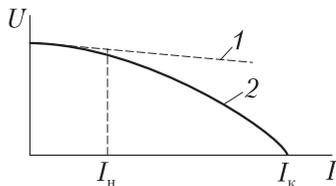


Рис. 7.19

Внешняя характеристика позволяет определить, в каких пределах изменяется напряжение генератора при изменении нагрузки.

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных скорости вращения и напряжении на зажимах генератора:

$$I_{\text{в}} = f(I) \quad (\text{при } n = \text{const и } U = \text{const}).$$

Регулировочная характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения, чтобы поддерживать постоянным напряжение генератора при изменении его нагрузки.

Мы видели, что с увеличением тока нагрузки напряжение генератора уменьшается. Чтобы поддерживать его постоянным, необходимо увеличивать ЭДС. При постоянной скорости вращения это достигается увеличением магнитного потока, а следовательно, и тока возбуждения (рис. 7.20).

Регулировочные характеристики используются при проектировании регуляторов напряжения.

Генераторы независимого возбуждения находят применение в схемах автоматики, в двигатель-генераторных агрегатах, когда требуется изменять не только величину, но и полярность напряжения на зажимах, а также в качестве тахогенераторов, предназначенных для дистанционного изменения скорости вращения.

Недостатком всех этих машин является необходимость иметь отдельный источник энергии для питания обмотки возбуждения или постоянные магниты.

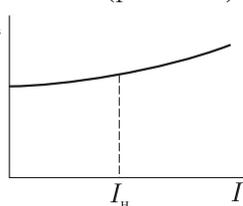


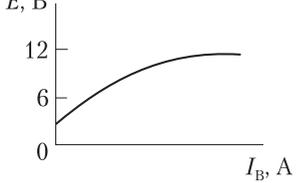
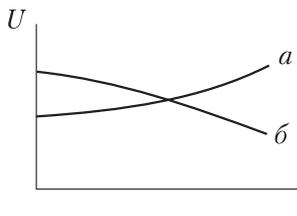
Рис. 7.20

Карточка № 7.8 (250)

Генератор постоянного тока независимого возбуждения

При независимом возбуждении как изменяются с увеличением нагрузки: а) магнитный поток главных полюсов; б) результирующий магнитный поток генератора?	а) Не изменяется; б) увеличивается	154
	а) Уменьшается; б) уменьшается	146
	а) Не изменяется; б) уменьшается	205
	а) Увеличивается; б) не изменяется	213

Продолжение карт. № 7.8

<p>Определите ЭДС остаточного намагничивания генератора по графику.</p> <p>$E, \text{В}$</p>  <p>$I_f, \text{А}$</p>	3 В	18
	Около 12 В	90
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	25
<p>Используя график предыдущей задачи, найдите примерное значение номинального напряжения машины.</p>	Около 12 В	159
	Около 6 В	239
	Около 18 В	20
<p>ЭДС генератора 240 В. Сопротивление обмотки якоря 0,1 Ом. Определите напряжение на зажимах генератора при токе нагрузки 100 А.</p>	240 В	72
	230 В	182
	220 В	184
<p>На графике изображены характеристики генератора независимого возбуждения. Какие это характеристики?</p> 	Для ответа на вопрос недостаточно данных	218
	a – внешняя; b – регулировочная	270
	a – регулировочная; b – внешняя	84

7.8. Генераторы с самовозбуждением

В генераторах с самовозбуждением питание обмотки главных полюсов осуществляется напряжением самого генератора. При этом отпадает необходимость в отдельном источнике энергии.

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения различают генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Генератор параллельного возбуждения. Схема генератора параллельного возбуждения, или шунтового генератора, изображена на рис. 7.21.

Ток якоря генератора разветвляется на ток нагрузки и ток возбуждения:

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}},$$

причем ток возбуждения составляет 1–3% от номинального тока нагрузки.

Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения аналогична характеристике генератора независимого возбуждения. Поскольку ток возбуждения невелик, генератор можно считать ненагруженным. При необходимости получить более точную характеристику обмотку возбуждения генератора параллельного возбуждения питают от отдельного источника.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рис. 7.22) показывает, что напряжение на его зажимах с увеличением тока нагрузки падает быстрее (кривая 1), чем при независимом возбуждении (кривая 2).

Падение напряжения на зажимах генератора объясняется тремя причинами:

а) уменьшением среднего значения магнитной индукции в машине вследствие реакции якоря;

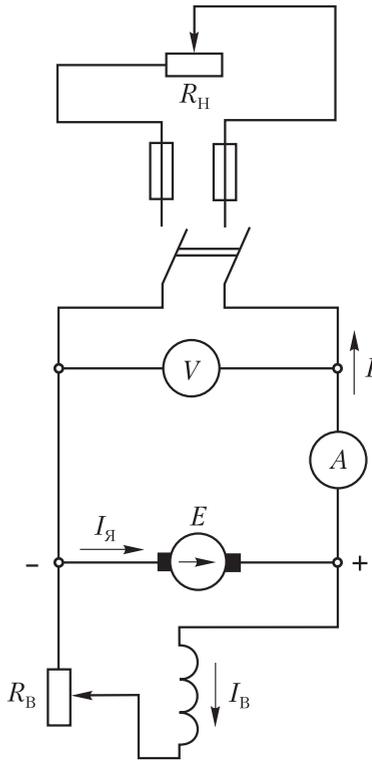


Рис. 7.21

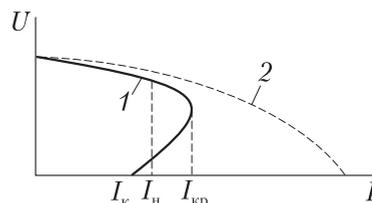


Рис. 7.22

б) увеличением падения напряжения внутри генератора;

в) уменьшением (вследствие двух первых причин) напряжения, подводимого к цепи возбуждения.

Ток нагрузки генератора может быть определен по закону Ома:

$$I = U / R_{\text{н}},$$

где U — напряжение на зажимах генератора, равное напряжению на обмотке возбуждения; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки.

При снятии внешней характеристики увеличение тока I осуществляется за счет уменьшения сопротивления $R_{\text{н}}$. Как указывалось, с увеличением тока I уменьшается напряжение U на зажимах генератора. Следовательно, при уменьшении $R_{\text{н}}$ одновременно уменьшается и U . При некотором значении тока нагрузки скорость уменьшения U сравнивается со скоростью уменьшения $R_{\text{н}}$ и, как очевидно из формулы закона Ома, увеличение тока прекращается. Это максимально возможное значение тока называют *критическим* током $I_{\text{кр}}$. При дальнейшем уменьшении сопротивления $R_{\text{н}}$ напряжение U падает относительно быстрее и ток нагрузки тоже начинает уменьшаться. Поэтому для генераторов параллельного возбуждения не опасны короткие замыкания. Ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ такого генератора обычно меньше номинального тока и создается только за счет остаточного намагничивания, поскольку напряжение на зажимах генератора, а следовательно, и напряжение, подводимое к цепи возбуждения, при коротком замыкании равно нулю.

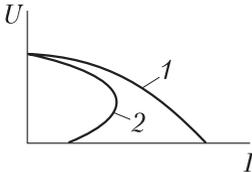
Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения в пределах рабочих токов нагрузки имеет такой же вид, как и у генератора независимого возбуждения. Для поддержания неизменного напряжения на зажимах генератора с возрастанием тока нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения, что достигается уменьшением сопротивления $R_{\text{в}}$ цепи возбуждения машины.

Генераторы постоянного тока параллельного возбуждения находят широкое применение, особенно в качестве

бортовых источников питания на подвижных объектах: кораблях, самолетах, автомобилях и т.д.

Карточка № 7.9 (177)

Генераторы параллельного возбуждения

У какого генератора обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря?	Независимого возбуждения	114
	Параллельного возбуждения	107
	Последовательного возбуждения	251
	Смешанного возбуждения	264
Как изменяются при параллельном возбуждении с увеличением нагрузки: а) магнитный поток главных полюсов; б) результирующий магнитный поток генератора?	а) Увеличивается; б) уменьшается	44
	а) Уменьшается; б) уменьшается	62
	а) Уменьшается; б) не изменяется	91
	а) Не изменяется; б) не изменяется	215
Покажите внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения. 	Кривая 1	275
	Кривая 2	23
Какой ток опасен для генератора параллельного возбуждения?	Ток короткого замыкания	124
	Критический ток	14
Как зависит от скорости вращения якоря ток короткого замыкания генератора параллельного возбуждения?	Не зависит	13
	С увеличением скорости вращения якоря ток короткого замыкания генератора увеличивается	71

Генератор последовательного возбуждения. Генератор последовательного возбуждения, или серийный генератор, назван так потому, что обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (схема на рис. 7.23, а). Для этого генератора $I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$.

Характеристика холостого хода, характеризующая магнитные свойства системы возбуждения, может быть снята только при независимом возбуждении.

Внешняя характеристика изображена на рис. 7.23, б. Пока магнитная система не насыщена, с увеличением тока нагрузки возрастает магнитный поток и ЭДС генератора. Однако по мере насыщения магнитопровода рост ЭДС замедляется, а размагничивающее действие реакции якоря проявляется все сильнее. Поэтому напряжение, достигнув максимального значения, начинает снижаться.

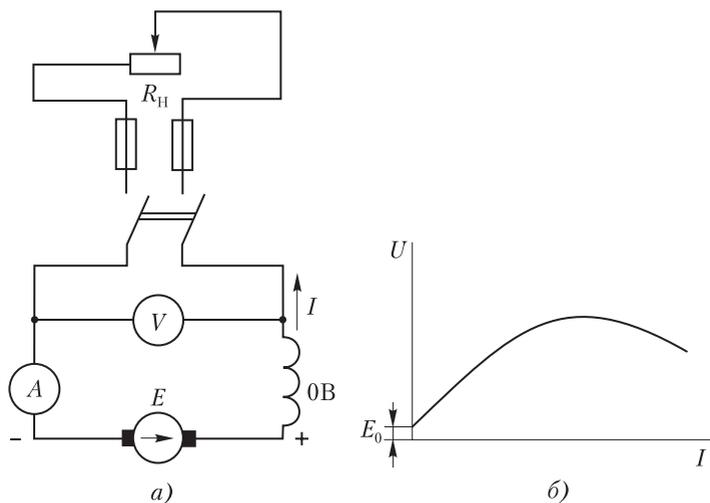


Рис. 7.23

Генераторы последовательного возбуждения используются сравнительно редко.

Генераторы смешанного возбуждения. Более широкое применение находят генераторы постоянного тока, у которых магнитный поток возбуждения создается двумя обмотками: шунтовой и серийной. Это генераторы смешанного возбуждения, или компаундные генераторы (рис. 7.24),

которые могут иметь согласно или встречно включенные обмотки возбуждения.

У генераторов с согласным включением обмоток напряжение почти не изменяется при изменении нагрузки. Это объясняется тем, что магнитный поток серийной обмотки создается током нагрузки и при увеличении нагрузки возрастает, компенсируя влияние реакции якоря и увеличение падения напряжения внутри машины. Генераторы с согласным включением обмоток применяются в тех случаях, когда требуется высокая стабильность напряжения питания при изменении нагрузки в широких пределах.

Генераторы со встречным включением обмоток имеют крутопадающую внешнюю характеристику. При увеличении тока нагрузки встречный поток серийной обмотки размагничивает машину, и напряжение генератора резко снижается. Такие машины используются в качестве сварочных генераторов, где требуется относительное постоянство сварочного тока при изменении напряжения в широких пределах вплоть до значений, близких к нулю (когда электрод касается свариваемых деталей).

Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения изображены на рис. 7.25, при согласном (кривая 1) и встречном (кривая 2) включении обмоток возбуждения.

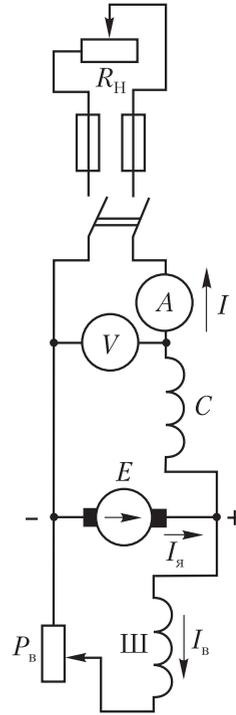


Рис. 7.24

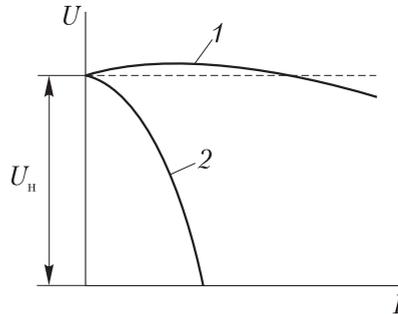


Рис. 7.25

Карточка № 7.10 (208)

Генераторы последовательного и смешанного возбуждения

Как изменяются с увеличением нагрузки при последовательном возбуждении: а) магнитный поток главных полюсов; б) результирующий магнитный поток генератора?	а) Увеличивается; б) уменьшается	277
	а) Не изменяется; б) увеличивается	255
	а) Увеличивается; б) увеличивается до максимума, затем уменьшается	102
Чем определяется величина ЭДС при холостом ходе генератора последовательного возбуждения?	Остаточным намагничиванием полюсов	245
	Скоростью вращения якоря	53
	Остаточным намагничиванием полюсов и скоростью вращения якоря	240
Какова основная причина, ограничивающая рост напряжения на зажимах генератора последовательного возбуждения при увеличении нагрузки?	Реакция якоря	55
	Падение напряжения на активном сопротивлении цепи якоря	177
	Насыщение магнитопровода	263
По приведенной внешней характеристике генератора смешанного возбуждения (рис. 7.25 кривая 2) определите, как включены обмотки возбуждения.	Согласно	118
	Встречно	144
Как надо включить обмотки возбуждения компаундного генератора, чтобы уменьшить влияние тока нагрузки на напряжение генератора?	Согласно	259
	Встречно	174

7.9. Самовозбуждение генераторов постоянного тока

У генераторов с самовозбуждением обмотка возбуждения получает питание от выходных зажимов генератора. Но при пуске ЭДС и напряжение генератора, а следовательно, и ток в обмотке возбуждения равны нулю. Возникает вопрос, возможен ли переход машины от такого обесточенного состояния к номинальному режиму, по мере того как приводной двигатель раскручивает якорь генератора до номинальной скорости. Оказывается, такой переход возможен при самовозбуждении генератора. Рассмотрим этот процесс более подробно.

Изобразим на одном графике зависимости напряжения U на зажимах генератора и напряжения U_B на обмотке возбуждения от тока возбуждения I_B (рис. 7.26).

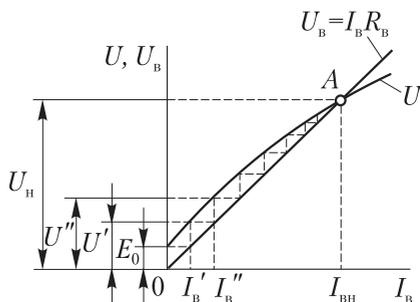


Рис. 7.26

Процесс самовозбуждения генератора параллельного возбуждения может протекать как при отсутствии, так и при наличии нагрузки. Обычно неработающий генератор автоматически отключается от сети и процесс самовозбуждения происходит при отсутствии нагрузки.

В последнем случае зависимость $U(I_B)$ практически совпадает с характеристикой холостого хода $E(I_B)$. При токе возбуждения, равном нулю, напряжение генератора не равно нулю, так как за счет остаточного намагничивания магнитной системы машины вырабатывается небольшая ЭДС. По мере увеличения тока возбуждения ЭДС и напряжение генератора быстро возрастают. Это возрастание резко замедляется при насыщении магнитной системы.

Что касается зависимости $U_B(I_B)$, то она определяется формулой закона Ома $U_B = I_B R_B$ и представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Наклон этой прямой к горизонтальной оси определяется величиной со-

противления цепи возбуждения R_v . Чем больше R_v , тем ближе к вертикали прямая.

В генераторе параллельного возбуждения обмотка возбуждения подключена к зажимам машины, поэтому всегда $U_v = U$.

На графике этому условию удовлетворяет точка A пересечения кривой $U(I_v)$ с прямой $U_v(I_v)$. Поэтому через короткое время напряжение и ток возбуждения генератора достигнут величин, соответствующих указанной точке.

Процесс самовозбуждения развивается следующим образом. За счет остаточного намагничивания в якоре создается ЭДС E_0 , вызывающая ток I'_v в обмотке возбуждения; току I'_v соответствует напряжение генератора U' ; это напряжение приложено к цепи возбуждения и создает ток возбуждения I''_v , которому соответствует напряжение генератора U''_v , и т.д.

Разложение процесса самовозбуждения на последовательные этапы является условным и сделано для лучшего понимания его сущности. В действительности этот процесс протекает непрерывно, причем значительную роль играют параметры, которые не были учтены (например, инерционность магнитного поля катушек возбуждения).

Рассмотрение сущности процесса позволяет сформулировать условия, при которых самовозбуждение возможно:

наличие остаточного намагничивания; если генератор полностью размагничен (что иногда встречается на практике), то через его обмотку возбуждения необходимо кратковременно пропустить ток от постороннего источника;

правильное подключение обмотки возбуждения к зажимам генератора; ток возбуждения должен создавать магнитный поток, складывающийся с потоком остаточного намагничивания; в противном случае генератор будет полностью размагничен;

правильный подбор сопротивления цепи возбуждения: при больших значениях R_v точка A (см. рис. 7.26) будет располагаться слишком низко и генератор не достигнет номинального напряжения.

Карточка № 7.11 (172)

Самовозбуждение генераторов постоянного тока

Для какого генератора процесс самовозбуждения невозможен?	Параллельного возбуждения	93
	Последовательного возбуждения	3
	Смешанного возбуждения	267
	Независимого возбуждения	52
Какое условие не относится к условиям самовозбуждения генератора?	Наличие остаточного намагничивания	64
	Правильная полярность включения обмотки возбуждения	160
	Правильный подбор сопротивления цепи возбуждения	136
	Номинальная скорость вращения якоря	212
Будет ли возбуждаться генератор параллельного возбуждения, если направление вращения его якоря изменить на противоположное?	Будет	161
	Не будет	257
Можно ли возбудить генератор последовательного возбуждения при холостом ходе?	Можно	37
	Нельзя	12
Будет ли возбуждаться генератор смешанного возбуждения, магнитная система которого полностью размагничена?	Будет	80
	Не будет	139

7.10. Потери энергии и коэффициент полезного действия генераторов постоянного тока

Любой процесс преобразования энергии из одного вида в другой сопровождается необратимыми потерями энергии, которые в конечном счете обращаются в тепло и рассеиваются в окружающую среду.

В генераторах постоянного тока различают следующие виды потерь:

- механические потери $P_{\text{мех}}$ на трение в подшипниках, на трение щеток о коллектор, на работу вентилятора и на трение якоря о воздух; в машинах малой и средней мощности механические потери составляют 3–4% от номинальной мощности генератора; с увеличением номинальной мощности процент механических потерь снижается;

- потери в сердечнике якоря на гистерезис и вихревые токи; (потери в стали $P_{\text{ст}}$); потери на гистерезис пропорциональны частоте перемагничивания якоря, т.е. скорости его вращения, а потери на вихревые токи — квадрату этой скорости;

- потери в обмотках якоря и возбуждения (потери в меди $P_{\text{м}}$); в соответствии с законом Джоуля — Ленца они пропорциональны сопротивлению обмотки и квадрату силы тока, протекающего по ней;

- потери в щеточных контактах $P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}$ (здесь $\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения на щетках; $I_{\text{я}}$ — ток якоря);

- добавочные потери $P_{\text{доб}}$ вследствие пульсаций магнитного потока, вызываемых зубцами якоря, и ряда других причин; их принимают равными 1% от номинальной мощности генератора.

Механические потери и потери в стали не зависят от нагрузки генератора. Потери в меди и щеточном контакте существенно изменяются при изменении нагрузки.

На энергетической диаграмме генератора (рис. 7.27) наглядно представлены различные виды потерь.

Коэффициентом полезного действия генератора (КПД) называют отношение электрической мощности P_2 , отдаваемой генератором в сеть, к механической мощности P_1 , развиваемой приводным двигателем на валу генератора:

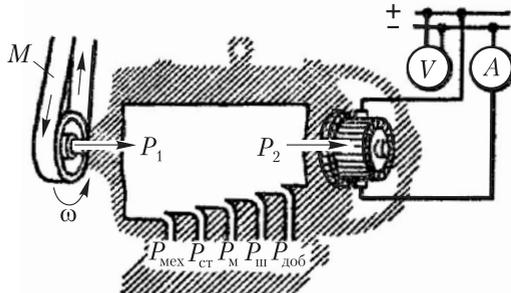


Рис. 7.27

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Подсчет КПД по этой формуле приводит к очень неточным результатам, так как погрешности измерения относительно высоких мощностей P_1 и P_2 выражаются в больших абсолютных цифрах.

Более точный результат дает формула, в которой потери выражены в явном виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{м}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{доб}} + P_1}.$$

Сумма ($P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$) составляет потери холостого хода и равна мощности, потребляемой генератором в режиме холостого хода за вычетом мощности, расходуемой в цепи возбуждения.

КПД генератора зависит от нагрузки (рис. 7.28). В частности, в режиме холостого хода КПД генератора равен нулю.

Генераторы рассчитывают таким образом, чтобы максимальный КПД достигался при значениях тока, близких к номинальному. Величина КПД генераторов постоянного тока мощностью до 100 кВт при номинальной нагрузке составляет 75–92%. Чем больше мощность машины, тем выше ее КПД.

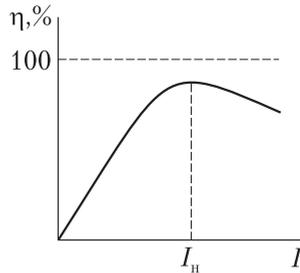


Рис. 7.28

Карточка № 7.12 (158)

Потери энергии и коэффициент полезного действия генераторов постоянного тока

Какие виды потерь энергии существуют в генераторах постоянного тока?	Потери на трение, потери в стали	190
	Потери в обмотках якоря и возбуждения	17
	Потери в щеточных контактах, добавочные потери	105
	Все виды потерь, перечисленные выше	48

Продолжение карт. № 7.12

При увеличении скорости вращения якоря в 2 раза как изменятся: а) потери на гистерезис; б) потери на вихревые токи в сердечнике якоря?	В 2 раза	110
	а) в 2 раза; б) в 4 раза	204
	а) в 2 раза; б) не изменятся	269
	В 4 раза	22
Как изменятся потери в обмотке якоря при увеличении нагрузки генератора в 2 раза?	Не изменятся	225
	Увеличатся в 2 раза	61
	Увеличатся в 4 раза	103
Мощность, потребляемая генератором от приводного двигателя, 50 кВт. Мощность, отдаваемая в сеть, 45 кВт. Определите КПД генератора, %.	75	171
	90	221
	92	79
Генератор отдает в сеть мощность 8 кВт. Суммарные потери мощности в генераторе 2 кВт. Определите КПД генератора, %	25	100
	80	82
	92	183

7.11. Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Вращающий момент

У двигателя параллельного возбуждения цепь обмотки возбуждения, так же как и цепь обмотки якоря, включена под постоянное напряжение сети. Цепь обмотки возбуждения можно питать и от отдельного источника постоянного тока (независимое возбуждение). И в том и в другом случае ток возбуждения *не зависит* от тока якоря.

Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения изображена на рис. 7.29. Обмотка якоря \mathcal{Y} включается в сеть через ступенчатый пусковой реостат $R_{\text{п}}$, обмотка возбуждения — через реостат $R_{\text{ш}}$. Токпроводящая ручка пускового реостата соединена с зажимом

L и до запуска двигателя находится на контакте O . При запуске она последовательно перемещается в крайнее левое положение. При этом цепь возбуждения непосредственно подсоединена к сети через дугообразный контакт III — шунт, а цепь якоря — через секции пускового реостата. В процессе пуска число включенных секций уменьшается, а по окончании пуска пусковой реостат полностью выводится. Такая конструкция пускового реостата исключает разрыв цепи якоря при переключении ручки с одного контакта на другой. Следует иметь в виду, что пусковой реостат не рассчитан на длительное пребывание под током якоря, поэтому при работе двигателя его ручка должна находиться в крайнем левом положении.

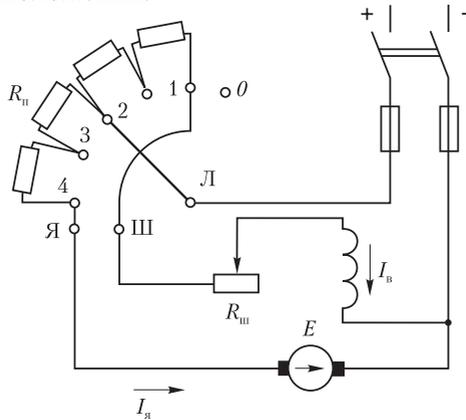


Рис. 7.29

Вращающий момент M двигателя определяется на основании закона Ампера $F = I_1 l B_{cp}$, где I_1 — ток в одном проводнике обмотки; l — действующая длина проводника; B_{cp} — среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины, и известной из механики формулы

$$M = F \frac{D}{2} N = B_{cp} I_1 l \frac{D}{2} N .$$

Здесь F — сила, действующая на один проводник обмотки якоря; D — диаметр якоря; N — общее число проводников в обмотке якоря.

Напомним, что $B_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi D l}$ (см. 4.4), а $I_1 = \frac{I_{я}}{2a}$.

После подстановок получаем

$$M = B_{\text{ср}} I_1 l \frac{D}{2} N = \frac{2p\Phi}{\pi D l} \cdot \frac{I_{\text{я}}}{2a} l \frac{D}{2} N = \frac{pN}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi.$$

Постоянный для данного двигателя коэффициент $\frac{pN}{2\pi a}$ обозначают c_M . Таким образом,

$$M = c_M I_{\text{я}} \Phi,$$

т.е. *вращающий момент двигателя прямо пропорционален току якоря и магнитному потоку возбуждения.*

Выражение для вращающего момента двигателя можно получить и другим способом.

Электромагнитная мощность P_3 , за счет которой создается момент, поворачивающий якорь, определяется формулой

$$P_3 = EI_{\text{я}},$$

где E — ЭДС в обмотке якоря машины, работающей как генератор, и противо-ЭДС машины, работающей как двигатель.

Из механики известно, что мощность, вращающий момент и угловая скорость вращения связаны соотношением $P_3 = M\omega$. Следовательно,

$$M\omega = EI_{\text{я}},$$

откуда

$$M = \frac{EI_{\text{я}}}{\omega}.$$

Угловая скорость ω , измеряемая в рад/с, и скорость вращения n , измеряемая в об/мин, легко выражаются друг через друга:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

Напомним, что ЭДС машины $E = c_E n \Phi$.

Произведя подстановки, получим

$$M = \frac{c_E n \Phi I_a}{2\pi n} = \frac{60 c_E}{2\pi} \Phi I_a = c_M \Phi I_a,$$

где $c_M = \frac{60 c_E}{2\pi}$.

Карточка № 7.13 (163)

Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Вращающий момент

На какой из схем пусковой реостат двигателя параллельного возбуждения включен правильно?		108
		243
		253
Определите силу, действующую на один проводник обмотки якоря, если $B_{cp} = 2 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{м}^2 = 2 \text{ Тл}$; $I_1 = 10 \text{ А}$; $l = 5 \text{ см}$.	1 Н	16
	100 Н	57
	1 кг	99
Определите вращающий момент двигателя, если $D = 5 \text{ см}$; $N = 200$ (остальные данные см. во втором задании).	10 Н · м	187
	5 Н · м	233
	500 Н · м	19

Продолжение карт. № 7.13

Постоянная машины, работающей в качестве генератора, равна 6,28. Определите постоянную машины, работающей в качестве двигателя.	6,28	140
	6	92
	60	130
Ток якоря увеличился в 2 раза. Как изменился вращающий момент двигателя параллельного возбуждения?	Не изменился	194
	Увеличился в 2 раза	241
	Увеличился в 4 раза	158

7.12. Связь между вращающим и полезным моментами на валу двигателя

Помимо вращающего момента M , возникающего в результате взаимодействия электрического тока с магнитным полем, на якорь двигателя действует ряд других моментов:

момент холостого хода M_0 , связанный с механическими потерями, а также с потерями в стали (составляет несколько процентов от вращающего момента);

полезный момент M_2 , создаваемый рабочей машиной, которая соединена с двигателем и приводится им в действие (выражается через полезную мощность на валу двигателя);

динамический момент $M_{\text{дин}}$ сил инерции, возникающий при изменении скорости вращения якоря.

Полезная мощность P_2 на валу указывается на заводском щитке двигателя в киловаттах. Зная эту мощность и скорость вращения двигателя, нетрудно определить полезный момент в Н · м:

$$M_2 = \frac{P_2 \cdot 10^3}{\omega} = \frac{P_2 \cdot 10^3}{\frac{2\pi n}{60}} = 9554 \frac{P_2}{n}.$$

Поскольку $1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кг}$,

$$M_2 = 975 \frac{P_2}{n} \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Таким образом, полезный момент в $\text{кг} \cdot \text{м}$ можно приближенно получить, разделив полезную мощность в ваттах на скорость вращения в об/мин.

Динамический момент $M_{\text{дин}}$ пропорционален моменту инерции вращающихся частей J и угловому ускорению:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Чем резче меняется скорость двигателя, тем больше динамический момент. В установившемся режиме, когда скорость вращения постоянна, динамический момент равен нулю.

Моменты двигателя связаны уравнением, которое носит название *уравнения моментов*:

$$M = M_0 + M_2 \pm M_{\text{дин}}.$$

В установившемся режиме

$$M = M_0 + M_2,$$

вращающий и тормозные моменты взаимно уравновешены, а якорь двигателя вращается по инерции со строго постоянной скоростью.

При пуске двигателя

$$M > M_0 + M_2,$$

а темп нарастания скорости двигателя ограничивается силами инерции ($M_{\text{дин}}$).

При торможении

$$M < M_0 + M_2,$$

при этом динамический момент не позволяет якорю остановиться мгновенно.

Карточка № 7.14 (164)

Связь между вращающим и полезным моментами на валу двигателя

Зависит ли момент холостого хода от скорости вращения двигателя?	Зависит	122
	Не зависит	46

Продолжение карт. № 7.14

При скорости вращения 975 об/мин двигатель отдает полезную мощность 5 кВт. Определите полезный момент M_2 .	5 кг · м	274
	Для решения задач недостаточно данных	173
Двигатель мощностью 1000 Вт вращается со скоростью 1000 об/мин. Определите примерно полезный момент M_2 .	0,001 кг · м	47
	1 кг · м	236
	Для решения задачи недостаточно данных	232
$M - M_{\text{дин}} = M_0 + M_2$. Как изменяется скорость вращения двигателя?	Увеличивается	106
	Уменьшается	166
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	207
$M + M_{\text{дин}} = M_0 + M_2$. Как изменяется скорость вращения двигателя?	Увеличивается	216
	Уменьшается	126
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	273

7.13. Механическая и рабочие характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

Зависимость установившейся скорости вращения от момента двигателя при постоянном напряжении питания цепей якоря и возбуждения называется *механической характеристикой* двигателя.

Зависимости скорости вращения n , тока якоря $I_{\text{я}}$, вращающего момента M и коэффициента полезного действия η от полезной мощности P_2 на валу двигателя при постоянном напряжении цепей якоря и возбуждения ($I_{\text{в}} = \text{const}$) называются *рабочими характеристиками* двигателя.

Механическая и рабочие характеристики двигателя независимого возбуждения идентичны аналогичным характеристикам двигателя параллельного возбуждения.

Выведем уравнение механической характеристики. Подведенное к цепи якоря напряжение расходуется во внутреннем сопротивлении машины и компенсирует противо-ЭДС:

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}} .$$

Подставив в это уравнение $E = c_E n \Phi$ и $I_{\text{я}} = M / (c_M \Phi)$, получим зависимость между n и M :

$$U = c_E n \Phi + \frac{M}{c_M \Phi} R_{\text{я}} .$$

Выразив эту зависимость в явном виде, получим уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M .$$

При отсутствии тормозного момента на валу скорость двигателя максимальна:

$$n_0 = U / (c_E \Phi) .$$

С увеличением момента скорость вращения двигателя уменьшается по линейному закону:

$$n = n_0 - kM ,$$

где k — постоянная величина.

Механическая характеристика рассматриваемых двигателей изображена на рис. 7.30.

Как очевидно из рисунка, скорость вращения двигателей при изменении тормозного момента в широких пределах (от 0 до номинального) изменяется незначительно. Поэтому говорят, что двигатели независимого и параллельного возбуждения имеют жесткую механическую характеристику.

Рабочие характеристики двигателей параллельного и независимого возбуждения представлены на рис. 7.31. Так как с увеличением полезной мощности P_2 вращающий момент возрастает, скорость вращения двигателя уменьшается (сравните с механической характеристикой). С увеличением вращающего момента увеличивается и пропорциональ-

ный ему ток якоря. Моменты M и M_2 отличаются на величину момента холостого хода.

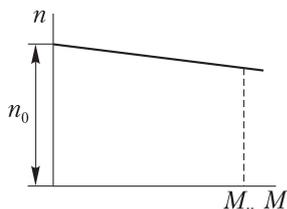


Рис. 7.30

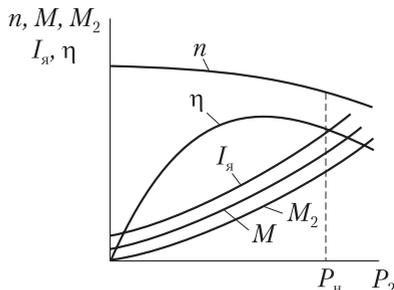


Рис. 7.31

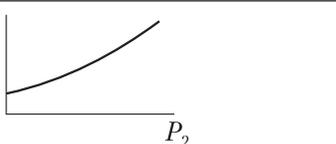
Как отмечалось, машина проектируется таким образом, чтобы наибольший КПД достигался при нагрузках, несколько меньших номинальной.

Карточка № 7.15 (166)

Механическая и рабочие характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

Укажите, характеристики двигателя: а) механическую; б) рабочую.	а) $n(P_2)$; б) $n(M)$	193
	а) $n(M)$; б) $I_я(P_2)$	208
	а) $n(P_2)$; б) $M(P_2)$	258
 а) б)	а) Рабочая; б) рабочая	265
	а) Механическая; б) рабочая	141
	а) Рабочая; б) механическая	15
Какие характеристики изображены на графиках?	Для ответа на вопрос недостаточно данных	209
 P_2	$M_2(P_2)$	156
	$M(P_2)$	197
	$I_я(P_2)$	157
	Любая из трех перечисленных выше	70

Продолжение карт. № 7.15

 <p style="text-align: center;">P_2</p>	$M(P_2)$	231
	$I_{я}(P_2)$	152
Какая из рабочих характеристик изображена на графике?	Любая из двух указанных выше	229
При какой нагрузке КПД двигателя достигает максимума?	Номинальной	113
	Равной примерно половине номинальной	132
	Несколько большей номинальной	198

7.14. Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

Обратимся еще раз к основному уравнению электродвигателя $U = E + I_{я}R_{я}$. Выражение для ЭДС двигателя ничем не отличается от выражения для ЭДС генератора. Это и понятно: и в том и в другом случае проводники обмотки пересекают силовые линии магнитного поля. Тот факт, что якорь генератора раскручивается механической, а якорь двигателя — электромагнитной силами, с точки зрения закона электромагнитной индукции роли не играет. Поэтому $E = c_E n \Phi$, и, следовательно,

$$U = c_E n \Phi + I_{я} R_{я}.$$

Отсюда находим выражение скорости вращения двигателя:

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c_E \Phi}.$$

С практической точки зрения важно представлять условия и способы регулирования скорости вращения двигателя. Выведенная формула позволяет решить эту задачу.

Прежде всего отметим, что для уменьшения потерь мощности сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ стремятся сделать по возможности малым (в реальных машинах оно составляет сотые или тысячные доли ома). В соответствии с этим и падение напряжения в активном сопротивлении якоря $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ невелико по сравнению с напряжением сети. Поэтому в формуле скорости вращения двигателя членом $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$ можно пренебречь. Тогда

$$n \approx U / (c_E \Phi).$$

Отсюда очевидно, что существует два способа плавного изменения скорости вращения двигателя в широких пределах:

- 1) изменение напряжения U , подведенного к якорю двигателя;
- 2) изменение магнитного потока возбуждения Φ (тока возбуждения $I_{\text{в}}$).

На рис. 7.32 показано возможное включение регулировочных реостатов в схему двигателя. Увеличивая сопротивление R_2 при постоянном напряжении сети U , будем уменьшать напряжение, подведенное к якорю, и скорость вращения двигателя. Увеличивая сопротивление R_1 , будем уменьшать ток возбуждения и магнитный поток возбуждения, а следовательно, увеличивать скорость вращения двигателя.

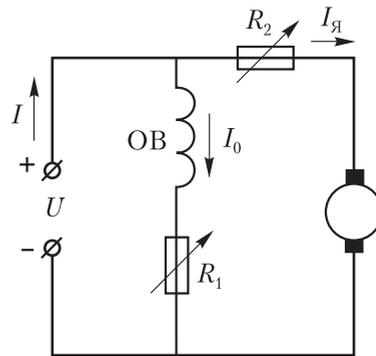


Рис. 7.32

Второй способ регулирования скорости вращения двигателя предпочтительнее, так как он связан с меньшими потерями мощности: ток возбуждения в десятки раз меньше тока якоря, а потери пропорциональны квадрату тока. Однако при необходимости изменять скорость вращения двигателя в очень широких пределах одновременно используют оба способа.

Возможность плавного и экономичного регулирования скорости вращения в широких пределах является важнейшим достоинством двигателей постоянного тока.

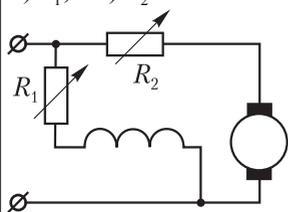
Выражение скорости вращения двигателя показывает, что по мере уменьшения магнитного потока возбуждения скорость неограниченно возрастает. С этой точки зрения опасен обрыв цепи возбуждения двигателя, при котором магнитный поток резко уменьшается до величины потока остаточного намагничивания, а двигатель идет «вразнос». Особенно вероятен режим «разноса» у ненагруженного двигателя. Режим «разноса» является аварийным: центробежные силы деформируют обмотку якоря, якорь заклинивается, а в некоторых случаях и разрушается.

У нагруженного двигателя увеличение скорости вращения происходит не столь резко, так как уменьшение магнитного потока при постоянном моменте вращения приводит к такому увеличению тока якоря, при котором произведением $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ уже нельзя пренебрегать. Но и в этом случае обрыв цепи возбуждения может быть опасным.

Карточка № 7.16 (203)

Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

При постоянном напряжении питания магнитный поток возбуждения уменьшился. Как изменилась скорость двигателя?	Увеличилась	50
	Не изменилась	112
	Уменьшилась	206
При прочих неизменных условиях напряжение, подведенное к обмотке якоря, уменьшилось. Как изменилась скорость вращения двигателя?	Увеличилась	119
	Не изменилась	87
	Уменьшилась	254
Как изменится скорость вращения двигателя при уменьшении: а) R_1 ; б) R_2 ?	а) Увеличится; б) уменьшится	279
	а) Уменьшится; б) увеличится	242



Продолжение карт. № 7.16

Какой способ регулирования скорости вращения предпочтительнее в предыдущей задаче?	Оба способа примерно равноценны	89
	Изменение R_1	202
	Изменение R_2	135
Как изменяется скорость вращения двигателя параллельного возбуждения при обрыве обмотки возбуждения в режиме холостого хода?	Двигатель останавливается	249
	Скорость резко возрастает	155

7.15. Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

В двигателе последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 7.33, *a*), поэтому магнитный поток Φ пропорционален току I (если пренебречь насыщением магнитопровода), и в формуле $M = c_M I \Phi$ следует положить $\Phi = kI$, где k — постоянный коэффициент.

Тогда

$$M = c_M k I^2.$$

Вращающий момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату силы тока.

Выразим магнитный поток через вращающий момент:

$$M = \frac{c_M}{k} \Phi^2; \quad \Phi = k_1 \sqrt{M}, \quad \text{где } k_1 = \sqrt{k / c_M}$$

и подставим в приближенное выражение скорости вращения двигателя:

$$n \approx \frac{U}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E k_1 \sqrt{M}}.$$

Отсюда очевидно, что для двигателя последовательного возбуждения опасен режим холостого хода, так как при

уменьшении момента на валу до нуля скорость вращения неограниченно увеличивается (рис. 7.33, б), двигатель идет «вразнос». Это обстоятельство требует такого сочленения двигателя последовательного возбуждения с рабочей машиной, при котором режим холостого хода был бы исключен. В частности, нельзя применять ременную передачу, так как при ослаблении или обрыве ремня может возникнуть аварийный режим.

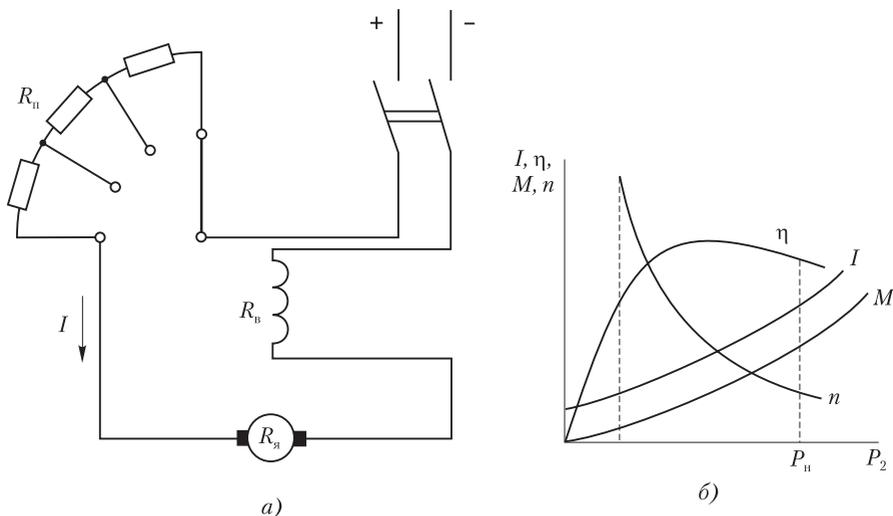


Рис. 7.33

Скорость вращения двигателя последовательного возбуждения можно регулировать либо изменением подводимого напряжения U (рис. 7.34, а), либо изменением магнитного потока возбуждения Φ за счет шунтирования обмотки возбуждения (рис. 7.34, б). Второй способ более экономичен.

Двигатель последовательного возбуждения имеет существенные преимущества благодаря квадратичной зависимости вращающего момента от тока. Так, например, он развивает большой пусковой момент, что очень важно для электропривода на транспорте (благодаря этому электропоезд способен быстро набирать скорость после остановки). Однако резко выраженная зависимость скорости вращения от нагрузки и опасность «вразноса» ограничивают область применения этих двигателей.

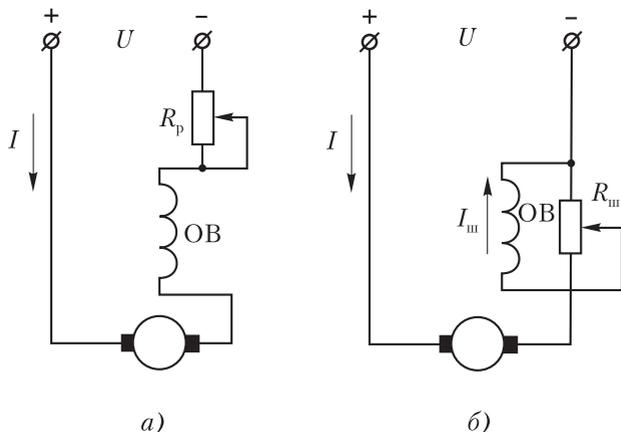


Рис. 7.34

Указанных недостатков лишены двигатели смешанного возбуждения (рис. 7.35).

Характеристики этих двигателей являются промежуточными между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

При согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет больший пусковой момент по сравнению с шунтовым двигателем. При встречном включении обмоток возбуждения двигатель приобретает жесткую механическую характеристику. С увеличением нагрузки магнитный поток серийной обмотки увеличивается и, вычитаясь из потока шунтовой обмотки, уменьшает общий поток возбуждения. При этом скорость вращения двигателя не только не уменьшается, а может даже увеличиваться (рис. 7.36). И в том и в другом случае наличие магнитного потока шунтовой обмотки исключает режим «разноса» двигателя при снятии нагрузки.

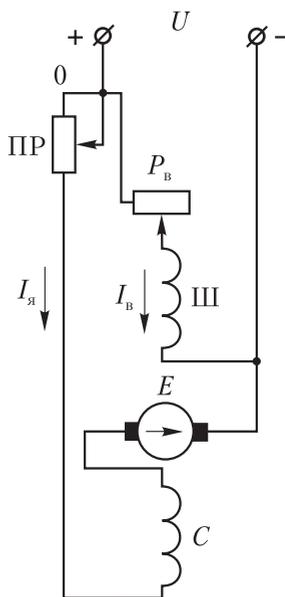


Рис. 7.35

Регулирование скорости вращения двигателя смешанного возбуждения осуществляют регулировочным реостатом в цепи шунтовой обмотки.

Двигатели смешанного возбуждения применяются в качестве тяговых и крановых двигателей, а также для привода прокатных станов, компрессоров, насосов.

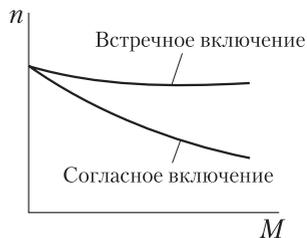
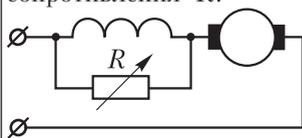


Рис. 7.36

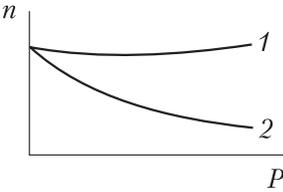
Карточка № 7.17 (212)

Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

Как изменится вращающий момент двигателя последовательного возбуждения, если его ток увеличился в 3 раза (насыщением магнитопровода пренебречь)?	Увеличится в 3 раза	115
	Увеличится в 9 раз	38
Во сколько раз пусковой момент двигателя последовательного возбуждения больше номинального момента, если пусковой ток превышает номинальный в 5 раз (насыщением магнитопровода пренебречь)?	В 5 раз	104
	В 25 раз	81
Что произойдет, если двигатель последовательного возбуждения подключить к сети при отключенной механической нагрузке на валу?	Двигатель не запустится	76
	Обмотка якоря перегреется	94
	Двигатель пойдет «вразнос»	234
Как изменится скорость вращения двигателя при увеличении сопротивления R ?	Увеличится	1
	Уменьшится	127



Продолжение карт. № 7.17

<p>Какая кривая является рабочей характеристикой двигателя смешанного возбуждения:</p> <p>а) с согласным; б) со встречным включением обмоток возбуждения?</p> 	<p>а) кривая 1; б) кривая 2</p>	214
	<p>а) кривая 2; б) кривая 1</p>	32

7.16. Пуск и реверсирование двигателей постоянного тока

Подключение двигателя к сети (пуск двигателя) имеет особенности, которые следует иметь в виду при эксплуатации машины.

В первый момент после пуска якорь вследствие своей инерционности остается неподвижным. При этом противо-ЭДС, пропорциональная скорости вращения якоря, равна нулю, а выражение $U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ имеет вид

$$U = I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Следовательно, в момент пуска потребляемый двигателем ток ограничивается только сопротивлением цепи якоря:

$$I_{\text{я}} = U/R_{\text{я}}.$$

Обмотка якоря имеет небольшое активное сопротивление, тем меньшее, чем мощнее двигатель (для уменьшения тепловых потерь). Поэтому в момент пуска ток двигателя может в десятки раз превышать ток, потребляемый в номинальном режиме.

Пусковые токи кратковременны. По мере раскручивания якоря и нарастания противо-ЭДС ток двигателя уменьшается, приближаясь к рабочему току.

Тем не менее наличие пусковых токов приводит к целому ряду нежелательных явлений. Если сеть, к которой подключается двигатель, имеет не очень большую мощность (например, бортовая самолетная сеть), то перегрузка сети большими пусковыми токами двигателей вызывает резкое снижение напряжения и нарушение работы всей системы: уменьшается накал ламп, срабатывают отдельные элементы коммутационной аппаратуры, отпускают электромагниты, возрастают погрешности приборов и т.д. Помимо этого протекание больших токов в цепи вызывает подгорание контактов выключателей, а также возникновение значительных сил притяжения и отталкивания между проводами, что может привести к механическим повреждениям электропроводки.

Большие пусковые токи вредны не только для питающей сети, но и для самого двигателя: подгорают коллектор и щетки, элементы конструкции двигателя испытывают толчки и механические перегрузки, наводятся большие ЭДС взаимной индукции, которые могут привести к пробоям изоляции проводов. Эти последствия пуска мощных двигателей настолько существенны, что заставляют применять специальные меры для ограничения пусковых токов.

Широкое применение находят пусковые реостаты, включаемые последовательно с обмоткой якоря. В момент пуска двигателя реостат введен. По мере разгона двигателя и возрастания противо-ЭДС якоря реостат выводит.

Следует иметь в виду, что пусковой реостат рассчитан на кратковременную работу. Если оператор не полностью выведет пусковой реостат после пуска двигателя, то реостат перегреется и выйдет из строя.

В настоящее время при высокой степени автоматизации оборудования пуск мощных электродвигателей осуществляется автоматически. Процесс пуска делится на несколько ступеней (двухступенчатый, трехступенчатый пуск). В момент подключения двигателя к сети контакты реле K_1 и K_2 разомкнуты (рис. 7.37). Величина пускового тока ограничена сопротивлениями R_1 и R_2 . Через некоторое время t_1 , когда якорь двигателя приобретает определенную скорость, замыкаются контакты первого реле K_1 , шунтирующие сопротивление R_1 . Теперь ток двигателя ограничивается сопротивлением R_2 и противо-ЭДС якоря. По мере возрастания противо-ЭДС в определенный момент времени t_2 срабатывает второе реле K_2 , шунтирующее сопротивление

R_2 . Процесс изменения тока двигателя при трехступенчатом пуске изображен на рис. 7.38.

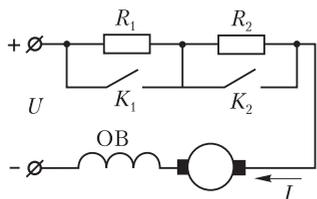


Рис. 7.37

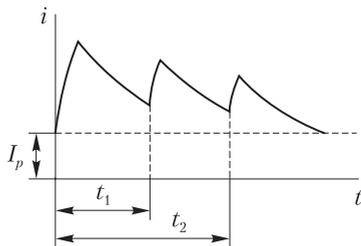


Рис. 7.38

Во многих случаях возникает необходимость менять направление вращения якоря двигателя. Изменение направления вращения называют *реверсированием*.

Для реверсирования двигателя постоянного тока следует изменить направление либо магнитного потока возбуждения, либо тока якоря. При одновременном изменении направления потока возбуждения и тока якоря за счет изменения полярности напряжения источника питания направление вращения якоря двигателя не изменится.

Схемы реверсирования двигателей постоянного тока изображены на рис. 7.39. В схеме рис. 7.39, а изменяется направление тока в якоря, а в схеме рис. 7.39, б — направление потока возбуждения. При этом одновременно работает только одна из двух встречно намотанных обмоток возбуждения $ОВ_1$ и $ОВ_2$.

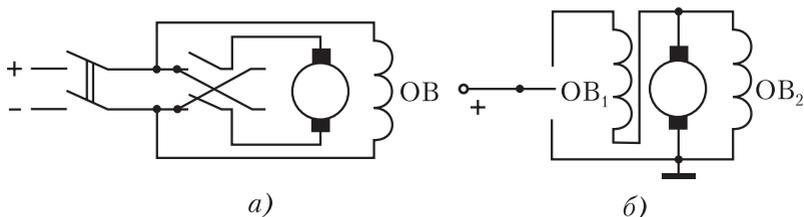


Рис. 7.39

Недостаток последней схемы состоит в том, что в любой момент времени одна из двух обмоток не участвует в создании магнитного потока возбуждения. Однако простота

и высокая надежность обеспечили этой схеме широкое применение для реверсирования двигателей последовательного возбуждения небольшой мощности.

Карточка № 7.18 (248)

Пуск и реверсирование двигателей постоянного тока

Почему в момент пуска двигателя через его якорь протекает большой ток?	Трение в подшипниках неподвижного якоря больше, чем у вращающегося	145
	В момент пуска активное сопротивление обмотки якоря мало	2
	В момент пуска отсутствует противо-ЭДС	178
Что произойдет, если ручку пускового реостата оставить в среднем положении после пуска двигателя?	Магнитный поток возбуждения не достигнет номинального значения	56
	Секции пускового реостата перегреются и сгорят	217
	Сгорят предохранители, защищающие двигатель от перегрузок	31
Для чего предназначен многоступенчатый пуск двигателя?	Уменьшения пусковых токов	95
	Уменьшения времени пуска	181
	Уменьшения тепловых потерь	75
В каком случае направление вращения двигателя не изменится?	При изменении направления тока якоря	83
	При изменении направления тока возбуждения	176
	При одновременном изменении направления тока якоря и тока возбуждения	129
Будет ли якорь двигателя постоянного тока вращаться при включении двигателя в сеть переменного тока промышленной частоты?	Будет	29
	Не будет	162

7.17. Потери энергии и КПД двигателей постоянного тока

Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока представлена на рис. 7.40. Электрическая мощность P_1 , потребляемая двигателем из сети, преобразуется в механическую мощность P_2 , отдаваемую рабочей машине. В процессе такого преобразования возникают потери, природа которых та же, что и в генераторах постоянного тока.

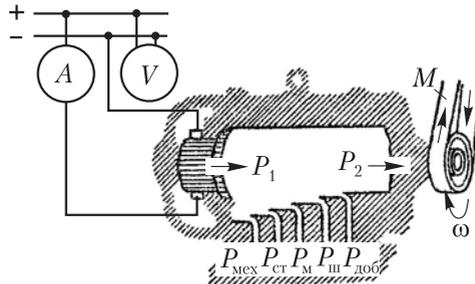


Рис. 7.40

КПД двигателя определяется отношением мощностей:

$$\eta = P_2 / P_1.$$

КПД двигателя зависит от нагрузки. В режиме холостого хода двигателя его КПД равен нулю, так как из сети потребляется мощность потерь холостого хода, а полезная мощность не вырабатывается.

С увеличением нагрузки двигателя его КПД повышается, достигая максимума при равенстве постоянных потерь и потерь, зависящих от потребляемого тока.

При номинальной нагрузке КПД двигателей постоянного тока равен 75% и выше. Чем больше номинальная мощность двигателя, тем выше его КПД. У двигателей мощностью 100 кВт КПД достигает 92%.

Обратимость машин постоянного тока позволяет повысить экономичность энергосистемы в целом. Это реализуется при так называемой рекуперации электрической энергии, суть которой поясняется следующим примером. При разгоне и движении электропоезда его двигатели потребляют электрическую энергию из сети; при торможении элект-

ропоезда двигатели переводятся в генераторный режим работы; при этом кинетическая энергия поезда преобразуется в электрическую, которая возвращается в сеть (рекуперируется), а поезд быстро останавливается.

Карточка № 7.19 (235)

Потери энергии и КПД двигателей постоянного тока

Какие виды потерь энергии существуют в двигателях постоянного тока?	Потери на трение, потери в стали	165
	Потери в обмотках якоря и возбуждения	170
	Потери в щеточных контактах, добавочные потери	74
	Все виды потерь, перечисленные выше	147
При напряжении 220 В двигатель потребляет из сети ток 20 А. Мощность на валу 3,3 кВт. Определите КПД двигателя, %.	75	30
	80	220
	92	278
Мощность, потребляемая двигателем при холостом ходе, равна 2 кВт. Определите КПД двигателя	$\eta=0$	77
	Для решения задачи недостаточно данных	237
Полезная мощность на валу двигателя 90 кВт. Суммарные потери мощности в двигателе 10 кВт. Определите КПД двигателя, %.	80	196
	90	121
На чем основана рекуперация электрической энергии?	На обратимости электрических машин	260
	На использовании кинетической энергии	131

ГЛАВА 8

ТРЕХФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

Три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° , образуют трехфазную симметричную систему. Аналогично получаются трехфазные системы напряжений и токов.

В настоящее время трехфазные системы получили широкое распространение, что объясняется главным образом следующими причинами:

при одинаковых напряжениях, мощностях потребителей и прочих равных условиях питание трехфазным током позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями;

при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности; то же относится к трехфазным двигателям и трансформаторам;

трехфазная система позволяет получить вращающееся магнитное поле с помощью трех неподвижных катушек, что существенно упрощает производство и эксплуатацию трехфазных двигателей;

при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного генератора, у которого мощность и момент на валу пульсируют с двойной частотой тока.

8.1. Принцип получения трехфазной ЭДС. Основные схемы соединения трехфазных цепей

На рис. 8.1 изображена схема простейшего трехфазного генератора, с помощью которой легко пояснить принцип получения трехфазной ЭДС. В однородном магнитном поле постоянного магнита вращаются с постоянной угло-

вой скоростью ω три рамки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

В момент времени $t = 0$ рамка $AХ$ расположена горизонтально и в ней индуцируется ЭДС

$$e_A = E_m \sin \omega t.$$

Точно такая же ЭДС будет индуцироваться и в рамке $ВУ$, когда она повернется на 120° и займет положение рамки $AХ$. Следовательно, при $t = 0$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ).$$

Рассуждая аналогичным образом, находим ЭДС в рамке $СZ$:

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

На рис. 8.2, *a* представлен график мгновенных значений ЭДС, e_A, e_B, e_C на рис. 8.2, *б* — векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

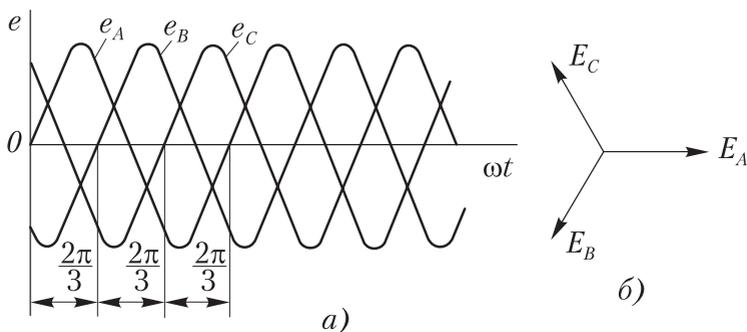


Рис. 8.2

Если к каждой из рамок $AХ, ВУ$ и $СZ$ подсоединить нагрузку (посредством щеток и контактных колец), то в образовавшихся цепях появятся токи.

При симметричной нагрузке, когда все три нагрузочных сопротивления равны по величине и имеют одинаковый характер, синусоиды напряжений и токов изображаются гра-

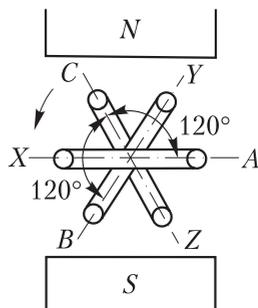


Рис. 8.1

фиками, аналогичными графику ЭДС. При этом начальные фазы токов определяются характером нагрузки, токи I_A, I_B, I_C равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на 120° один относительно другого. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при симметричной нагрузке изображена на рис. 8.3.

Следует отметить, что в реальном трехфазном генераторе три неподвижные обмотки размещаются на статоре, а магнитное поле, индукция которого распределена по синусоидальному закону, создается вращающимся ротором.

Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует трехфазную цепь.

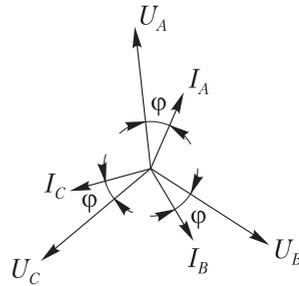


Рис. 8.3

В трехфазной цепи протекает

трехфазная система токов, т.е. синусоидальные токи с тремя различными фазами. Участок цепи, по которому протекает один из токов, называют фазой трехфазной цепи.

Возможны различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой. На рис. 8.4 показана несвязанная трехфазная цепь, в которой каждая обмотка генератора питает свою фазную нагрузку. Такая цепь, требующая шести соединительных проводов, практически не применяется.

В целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют звездой или треугольником. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

На электрических схемах трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° друг к другу. При соединении звездой (рис. 8.5) концы этих обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают θ . Начала обмоток обозначают буквами A, B, C .

При соединении треугольником (рис. 8.6) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй — с началом третьей, конец третьей — с началом первой. К точкам A, B, C подсоединяются провода соединительной линии.

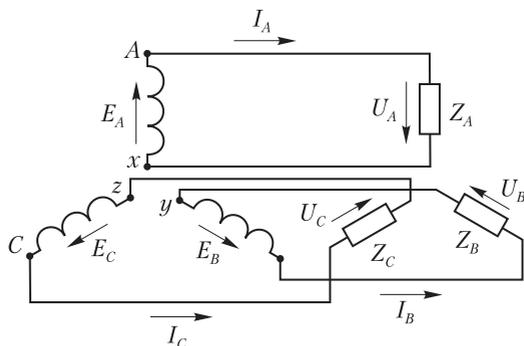


Рис. 8.4

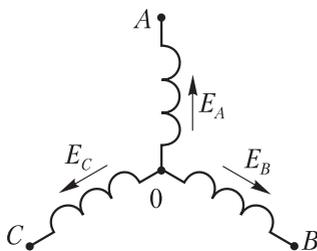


Рис. 8.5

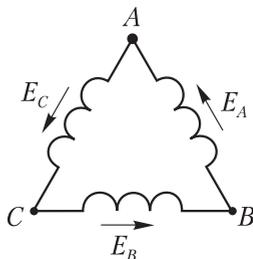


Рис. 8.6

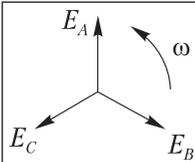
Отметим, что при отсутствии нагрузки ток в обмотках треугольника отсутствует, так как геометрическая сумма ЭДС E_A , E_B и E_C равна нулю.

Карточка № 8.1 (195)

Принцип получения трехфазной ЭДС. Основные схемы соединений трехфазных цепей

При вращении рамок против часовой стрелки в них индуцируются ЭДС $e_A = E_m \sin \omega t; e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ);$ $e_C = E_m \sin (\omega t + 120^\circ).$ Какие ЭДС будут индуцироваться при вращении рамок по часовой стрелке?	Те же самые	73
	Знаки начальных фаз изменятся на противоположные	43
	Направления векторов ЭДС в рамках изменятся на противоположные	84

Продолжение карт. № 8.1

	Изменится	8
<p>По ходу вращения за вектором E_A следует вектор E_B, за вектором E_B — вектор E_C. Изменится ли порядок следования векторов (порядок чередования фаз), если изменить направление вращения рамок?</p>	Не изменится	59
<p>Какие характеристики изменятся, если при прочих равных условиях увеличить скорость вращения рамок?</p>	Частота и начальные фазы	31
	Частота и амплитуды.	98
	Амплитуды и начальные фазы	17
<p>Сколько соединительных проводов подходит к генератору, обмотки которого образуют звезду?</p>	6	28
	3 или 4	104
	3	14
	4	77
<p>С какой точкой соединяется начало первой обмотки при соединении обмоток генератора треугольником?</p>	С началом второй	50
	С концом второй	88
	С концом третьей	1

8.2. Соединение трехфазной цепи звездой. Четырехпроводная и трехпроводная цепи

Рассмотрим соединение генератора с нагрузкой, включенной звездой (рис. 8.7) в трехфазной электрической цепи с нулевым проводом.

Провод $00'$ называют нулевым проводом (четырехпроводная цепь). В соответствии с первым законом Кирхгофа находим, что в нулевом проводе ток

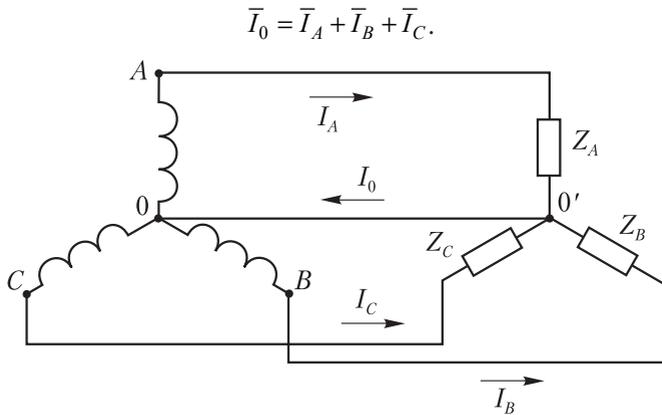


Рис. 8.7

Как отмечалось, при симметричной нагрузке, когда сопротивления z_A , z_B и z_C равны между собой и имеют одинаковый характер, векторы токов \bar{I}_A , \bar{I}_B , \bar{I}_C равны по абсолютной величине и образуют трехлучевую звезду, у которой углы между лучами равны 120° .

Из простого геометрического построения, показанного на рис. 8.8, следует, что в этом случае векторная сумма токов равна нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Таким образом, при симметричной нагрузке нулевой провод не нужен. Получается схема трехфазной трехпроводной цепи, изображенная на рис. 8.9.

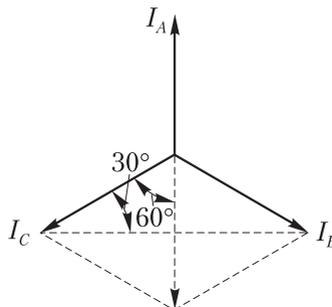


Рис. 8.8

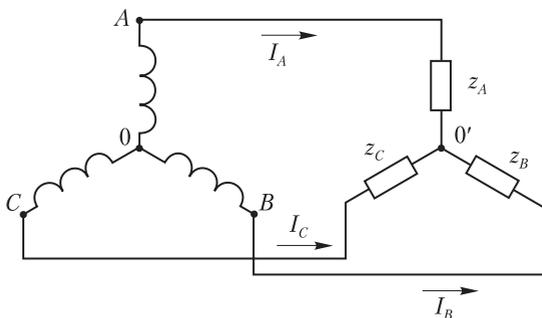


Рис 8.9

Соединение звездой с нулевым проводом принято условно обозначать значком \perp , а соединение звездой без нулевого провода — значком \blacktriangle .

Площадь поперечного сечения нулевого провода принимают равной половине площади поперечного сечения каждого из трех остальных проводов (их сечения равны между собой).

Карточка № 8.2 (294)

Соединение трехфазной цепи звездой. Четырехпроводная и трехпроводная цепи

Укажите правильное определение фазы.	Фазой называется аргумент синуса в выражениях вида $e_A = E_m \sin \omega t$, $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ и т.д.	95
	Фазой называется часть многофазной цепи, где протекает один из токов I_A, I_B и т.д.	25
	Оба приведенных выше определения правильны	68
Токи I_A, I_B, I_C создаются симметричной трехфазной системой ЭДС. Чему равно действующее значение векторной суммы $\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$?	Сумме действующих значений фазных токов	47
	Меньше суммы действующих значений фазных токов и только в предельном случае равно ей	80
	Всегда меньше суммы действующих значений фазных токов	12

Продолжение карт. № 8.2

Чему равен ток в нулевом проводе при симметричной трехфазной системе токов?	Нулю	55
	Величине, меньшей суммы действующих значений фазных токов	34
Всегда ли векторная сумма токов фаз равняется нулю при отсутствии нулевого провода?	Всегда	93
	Не всегда	20
Может ли ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи равняться нулю?	Может	66
	Не может	41
	Он всегда равен нулю	91

8.3. Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в трехфазной цепи, соединенной звездой

Система ЭДС обмоток трехфазного генератора, работающего в энергосистеме, всегда симметрична: ЭДС поддерживаются строго постоянными по амплитуде и сдвинутыми по фазе на 120° (соединение звездой).

Рассмотрим симметричную нагрузку (рис. 8.10), для которой:

$$z_A = z_B = z_C = z; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi.$$

К зажимам A, B, C подходят провода линии электропередачи — линейные провода.

Введем обозначения: токи в проводах линии электропередачи — линейные токи $I_{\text{л}}$, токи в сопротивлениях (фазах) нагрузки — фазные токи $I_{\text{ф}}$, напряжения между линейными проводами — линейные напряжения $U_{\text{л}}$, напряжения на фазах нагрузки — фазные напряжения $U_{\text{ф}}$.

В рассматриваемой схеме фазные и линейные токи совпадают: $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$, напряжения U_{AB}, U_{BC} , и U_{CA} являются линейными, а напряжения U_A, U_B, U_C — фазными. Складывая напряжения, находим (см. рис. 8.10):

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B;$$

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C;$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

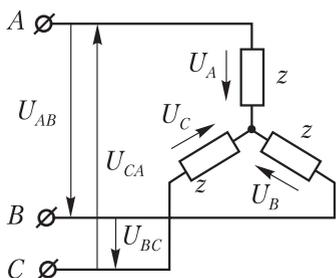


Рис. 8.10

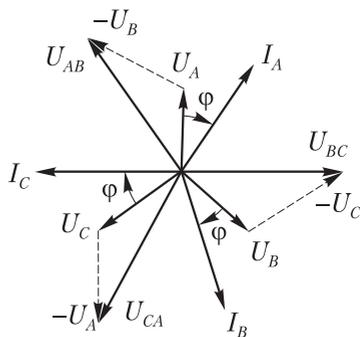


Рис. 8.11

Векторную диаграмму, удовлетворяющую этим уравнениям (рис. 8.11), начинаем строить с изображения звезды фазных напряжений $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$. Затем строим вектор \bar{U}_{AB} — как геометрическую сумму векторов \bar{U}_A и $-\bar{U}_B$, вектор \bar{U}_{BC} — как геометрическую сумму векторов \bar{U}_B и $-\bar{U}_C$ и вектор \bar{U}_{CA} — как геометрическую сумму векторов \bar{U}_C и $-\bar{U}_A$.

Для полноты картины на векторной диаграмме изображены также векторы токов, отстающих на угол φ от векторов соответствующих фазных напряжений (нагрузку считаем индуктивной).

На построенной векторной диаграмме начала всех векторов совмещены в одной точке (полюсе), поэтому ее называют полярной. Основное достоинство полярной векторной диаграммы — ее наглядность.

Уравнениям, связывающим векторы линейных и фазных напряжений, удовлетворяет также векторная диаграмма (рис. 8.12), которую называют топографической. Она позволяет графически определить напряжение между любыми точками схемы, изображенной на рис. 8.10. Так, например, для определения напряжения между зажимом C и точкой, которая делит пополам сопротивление, включенное в фазу B ,

достаточно соединить на векторной диаграмме точку C и точку, делящую вектор \vec{U}_B пополам. На диаграмме вектор искомого напряжения показан пунктиром.

При симметричной нагрузке модули векторов фазных и линейных напряжений соответственно равны между собой. Тогда топографическую диаграмму можно изобразить так, как показано на рис. 8.13.

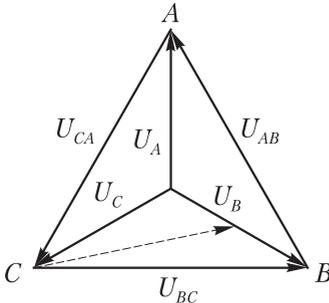


Рис. 8.12

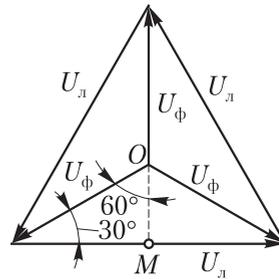


Рис. 8.13

Опустив перпендикуляр OM и решая прямоугольный треугольник, находим

$$\frac{U_{\text{л}}}{2} = \sqrt{U_{\phi}^2 - \frac{U_{\phi}^2}{4}} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{2}.$$

Таким образом, в симметричной звезде фазные и линейные токи и напряжения связаны соотношениями:

$$I_{\text{л}} = I_{\phi}; \quad U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}.$$

Карточка № 8.3 (189)

Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в трехфазной цепи, соединенной звездой

Какой из токов является линейным, а какой — фазным?	Оба тока линейные	6
	Оба тока фазные	64
	Ток I_1 — линейный, ток I_2 — фазный	29
	Ток I_2 — линейный, ток I_1 — фазный	105

Продолжение карт. № 8.3

Между различными точками схемы, изображенной на рис. 8.7, включены вольтметры. Какой из них показывает линейное, а какой — фазное напряжение?	Напряжение U_{AO} — линейное, напряжение U_{BO} — фазное	15
	Напряжение U_{AB} — линейное, напряжение U_{BC} — фазное	78
	Напряжение U_{CA} — линейное, напряжение U_{CO} — фазное	51
$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A$. Чему равен вектор \bar{U}_{AC} ?	$\bar{U}_{AC} = -\bar{U}_C - \bar{U}_A$	89
	$\bar{U}_{AC} = \bar{U}_A - \bar{U}_C$	2
	$\bar{U}_{AC} = \bar{U}_C + \bar{U}_A$	62
Почему полярная и топографическая векторные диаграммы удовлетворяют одной и той же системе векторных уравнений?	Потому, что уравнения имеют векторную форму	36
	Потому, что уравнения написаны для симметричной нагрузки	101
	Потому, что векторы можно переносить параллельно их начальному положению	22
Симметричная нагрузка соединена звездой. Линейное напряжение $U_{л} = 380$ В. Определите фазное напряжение.	$U_{\phi} = 380$ В	74
	$U_{\phi} = 250$ В	44
	$U_{\phi} = 220$ В	85
	$U_{\phi} = 127$ В	9

8.4. Назначение нулевого провода в четырехпроводной цепи

Ток в нулевом проводе равен нулю при строго симметричной нагрузке. Если нагрузка несимметричная, т.е. $z_A \neq z_B \neq z_C$, то неравными будут и токи $I_A \neq I_B \neq I_C$. Тогда на основе построения, аналогичного приведенному на рис. 8.8, нетрудно убедиться, что при симметрии фазных напряжений ток в нулевом проводе не будет равен нулю: $I_0 \neq 0$ (за исключением некоторых частных случаев).

Итак, при симметрии фазных напряжений и несимметрии нагрузки в нулевом проводе есть ток. Представим себе, что нулевой провод оборвался, $I_0 = 0$. При этом токи I_A, I_B, I_C должны измениться так, чтобы их векторная сумма оказалась равной нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Но при заданных сопротивлениях нагрузки z_A, z_B, z_C токи могут измениться только за счет изменения фазных напряжений. Следовательно, обрыв нулевого провода в общем случае приводит к изменению фазных напряжений, симметричные фазные напряжения становятся несимметричными.

Рассмотрим топографическую векторную диаграмму, представленную на рис. 8.14. Для простоты пренебрежем падением напряжения внутри обмоток генератора и проводах линии и будем считать, что напряжения на нагрузке равны ЭДС генератора.

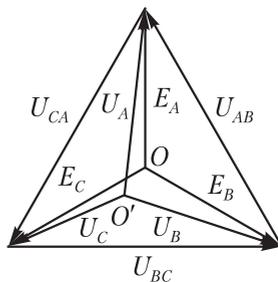


Рис. 8.14

При несимметрии нагрузки и отсутствии нулевого провода фазные напряжения U_A, U_B, U_C

будут различными и точка O' займет на векторной диаграмме положение, отличное от точки O .

Включим теперь нулевой провод с пренебрежимо малым сопротивлением, как показано на рис. 8.7. При этом потенциалы точек O и O' окажутся одинаковыми. Это значит, что точки O и O' на топографической диаграмме (рис. 8.14) должны быть совмещены.

Точка O на топографической диаграмме не может изменить своего положения, так как симметрия ЭДС E_A, E_B, E_C обеспечивается конструкцией генератора. Следовательно, точка O' перейдет в точку O , т.е. фазные напряжения на нагрузке станут симметричными.

Таким образом, нулевой провод в четырехпроводной цепи предназначен для обеспечения симметрии фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

Несимметрия фазных напряжений недопустима, так как приводит к нарушению нормальной работы потребителей.

Карточка № 8.4 (233)

Назначение нулевого провода в четырехпроводной цепи

Может ли геометрическая сумма линейных токов быть отличной от нуля при отсутствии нулевого провода?	Может	60
	Не может	32
Будут ли меняться линейные токи при обрыве нулевого провода в случае: а) симметричной нагрузки; б) несимметричной нагрузки?	а) Будут; б) не будут	99
	а) Будут; б) будут	18
	а) Не будут; б) не будут	71
	а) Не будут; б) будут	53
За счет чего могут измениться линейные токи при неизменной ЭДС генератора и неизменных сопротивлениях нагрузки?	Изменения линейных напряжений	82
	Изменения фазных напряжений	4
	Изменения фазных и линейных напряжений	57
Чему равна разность потенциалов точек O и O' при наличии нулевого провода с активным сопротивлением R_0 ?	Нулю	39
	$I_0 R_0$	96
	Линейному напряжению	26
Может ли нулевой провод, обладающий большим активным сопротивлением, обеспечить симметрию фазных напряжений при несимметричной нагрузке?	Может	69
	Не может	48

8.5. Соединение нагрузки треугольником. Векторные диаграммы, соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями

Треугольником могут быть соединены как обмотки генератора, так и фазы нагрузки. При соединении треугольником фазные и линейные напряжения равны: $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ (рис. 8.15).

Применяя первый закон Кирхгофа к узлам A , B и C , найдем связь между линейными I_A, I_B, I_C и фазными I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} токами. Для векторов токов справедливы соотношения:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA};$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB};$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

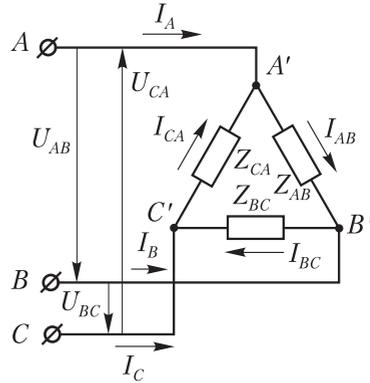


Рис. 8.15

Этим уравнениям удовлетворяют векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной цепи, представленные на рис. 8.16, *а* и 8.16, *б* соответственно. При симметричной нагрузке

$$I_A = I_B = I_C = I_{\text{л}};$$

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\phi}.$$

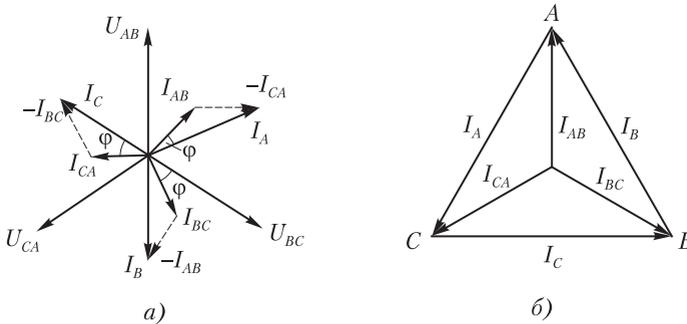


Рис. 8.16

Из треугольника фазных и линейных токов (рис. 8.17) находим соотношение между фазными и линейными токами при соединении нагрузки треугольником:

$$I_{\text{л}} = 2I_{\text{ф}} \cos 30^\circ = 2I_{\text{ф}} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

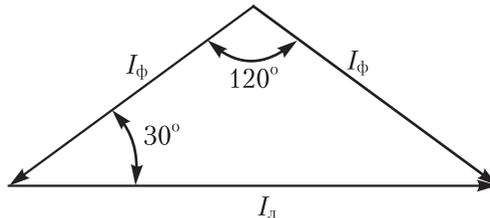


Рис. 8.17

Таким образом, при соединении треугольником

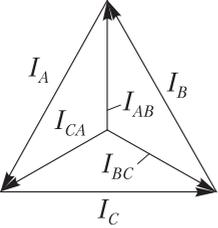
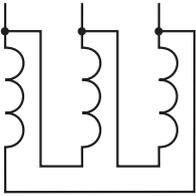
$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}; \quad I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

Карточка № 8.5 (118)

Соединение нагрузки треугольником. Векторные диаграммы, соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями

<p>Напишите систему уравнений, связывающих векторы линейных и фазных токов.</p>	$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA}; \\ I_B &= I_{BC} - I_{AB}; \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC} \end{aligned}$	37
	$\begin{aligned} I_A &= I_{CA} - I_{AB}; \\ I_B &= I_{AB} - I_{BC}; \\ I_C &= I_{BC} - I_{CA} \end{aligned}$	102
	$\begin{aligned} I_A &= I_{CA} + I_{AB}; \\ I_B &= I_{AB} + I_{BC}; \\ I_C &= I_{BC} + I_{CA} \end{aligned}$	23

Продолжение карт. № 8.5

<p>Удовлетворяет ли эта диаграмма уравнениям токов для изображенной выше схемы?</p> 	Да	61
	Нет	33
<p>Как соединены эти обмотки?</p> 	Звездой	75
	Треугольником	45
	Другим способом	86
<p>Линейное напряжение 380 В. Определите фазное напряжение, если симметричная нагрузка соединена треугольником.</p>	380 В	100
	220 В	19
	127 В	72
<p>Линейный ток 2,2 А. Определите фазный ток, если симметричная нагрузка соединена треугольником.</p>	3,8 А	54
	2,2 А	83
	1,27 А	10

8.6. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи. Коэффициент мощности

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Реактивная мощность трехфазной цепи равна сумме реактивных мощностей ее фаз:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C .$$

Очевидно, что в симметричной трехфазной цепи

$$P_A = P_B = P_C = P_\Phi ;$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = Q_\Phi .$$

Тогда

$$P = 3P_\Phi ; \quad Q = 3Q_\Phi .$$

Мощность одной фазы определяется по формулам для однофазной цепи. Таким образом,

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi ;$$

$$Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi .$$

Эти формулы можно использовать для подсчета мощности симметричной трехфазной цепи. Однако измерения фазных напряжений и токов связаны с некоторыми трудностями, так как необходим доступ к нулевой точке. Проще измерить линейные токи и напряжения непосредственно на клеммах щита питания. Поэтому формулы мощности трехфазной системы записывают через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = 3 \frac{U_\Pi}{\sqrt{3}} I_\Pi \cos \varphi = \sqrt{3} U_\Pi I_\Pi \cos \varphi .$$

При соединении треугольником

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = 3U_\Pi \frac{I_\Pi}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_\Pi I_\Pi \cos \varphi .$$

Таким образом, в обоих случаях активная мощность симметричной цепи

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Аналогично реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}.$$

Коэффициент мощности симметричной трехфазной цепи находят как отношение активной и полной мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}} = \frac{P}{S}.$$

Все эти формулы точны для симметричных цепей. Реальные цепи рассчитывают таким образом, чтобы их нагрузка была близка к симметричной, поэтому приведенные формулы имеют широкое применение.

Карточка № 8.6 (246)

**Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи.
Коэффициент мощности**

Фазное напряжение 220 В, фазный ток 5 А. Нагрузка симметричная. Коэффициент мощности 0,8. Определите активную мощность трехфазной цепи.	$P = 880$ Вт	5
	$P = 1100$ Вт	58
	$P = 2640$ Вт	40
Определите реактивную мощность трехфазной цепи в условиях предыдущей задачи.	$Q = 660$ ВАр	97
	$Q = 1100$ ВАр	27
	$Q = 2640$ ВАр	70
	$Q = 1980$ ВАр	49
Линейное напряжение 220 В, линейный ток 5 А. Нагрузка симметричная. Коэффициент мощности 0,8. Определите активную мощность трехфазной цепи.	$P = 1140$ Вт	81
	$P = 1100$ Вт	13
	$P = 1520$ Вт	56

Продолжение карт. № 8.6

Определите реактивную мощность трехфазной цепи в условиях предыдущей задачи.	$Q = 380 \text{ ВАр}$	35
	$Q = 1140 \text{ ВАр}$	94
	$Q = 1100 \text{ ВАр}$	21
	$Q = 1520 \text{ ВАр}$	67
Линейное напряжение 220 В; линейный ток 2 А; активная мощность трехфазной цепи $P = 380 \text{ Вт}$. Определите коэффициент мощности.	$\cos \varphi = 0,8$	42
	$\cos \varphi = 0,6$	92
	$\cos \varphi = 0,5$	7
	$\cos \varphi = 0,4$	65

8.7. Выбор схем соединения осветительной и силовой нагрузок при включении их в трехфазную сеть

При выборе схемы соединения нагрузки (звезда, треугольник, звезда с нулевым проводом) необходимо учитывать три основных фактора: характер нагрузки; номинальное напряжение сети; номинальное напряжение потребителей. Рассмотрим примеры.

1. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если

$$U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}, \quad U_{\text{лампы}} = 220 \text{ В}.$$

Прежде всего устанавливаем, что лампы должны быть включены на фазное напряжение. Действительно,

$$U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Поэтому выбираем схему соединения звездой. Поскольку нагрузка осветительная, надо предположить ее несимметрию и для обеспечения симметрии фазных напряжений включить нулевой провод. Следовательно, заданным условиям удовлетворяет схема соединения звездой с нулевым проводом.

2. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если

$$U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}, \quad U_{\text{лампы}} = 220 \text{ В}.$$

В рассматриваемом случае лампы должны быть включены непосредственно на линейное напряжение. Выбираем схему соединения треугольником. Симметрия линейных напряжений обеспечивается генераторами, питающими сеть.

3. Выбрать схему соединения обмоток (фаз) трехфазного двигателя, если $U_{\text{обм}} = 220 \text{ В}$, $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$.

Обмотки трехфазного двигателя образуют симметричную нагрузку, следовательно, в нулевом проводе нет необходимости. Если обмотки двигателя соединить треугольником, то каждая из них окажется под линейным напряжением 380 В и перегреется. Следовательно, обмотки двигателя надо соединить звездой. Тогда к каждой обмотке будет приложено напряжение, на которое она рассчитана: $U_{\phi} = 220 \text{ В}$.

Карточка № 8.7 (118)

Выбор схем соединения осветительной и силовой нагрузок при включении их в трехфазную сеть

Лампы накаливания с номинальным напряжением 127 В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определите схему соединения ламп.	Звезда	30
	Звезда с нулевым проводом	106
	Треугольник	16
	Лампы нельзя включать в эту сеть	79
В ту же сеть включается трехфазный двигатель, обмотки которого рассчитаны на 127 В. Как надо соединить обмотки двигателя?	Звездой	52
	Треугольником	90
	Двигатель нельзя включать в эту сеть	3
Трехфазный двигатель, рассмотренный в предыдущей задаче, включается в сеть с линейным напряжением 380 В. Как надо соединить обмотки двигателя?	Звездой	63
	Треугольником	38
	Двигатель нельзя включать в эту сеть	103

Продолжение карт. № 8.7

Лампы накаливания с номинальным напряжением 220 В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определите схему соединения ламп	Звезда	24
	Звезда с нулевым проводом	76
	Треугольник	46
В ту же сеть включается трехфазный двигатель, обмотки которого рассчитаны на 220 В. Как надо соединить обмотки двигателя?	Звездой	87
	Треугольником	11

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

9.1. Вращающееся магнитное поле

Вращающееся магнитное поле двухфазного тока. Рассмотрим образование вращающегося магнитного поля на примере двухфазного синусоидального тока и двух катушек, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на угол 90° (рис. 9.1).

Катушка 1 создает магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны к ее плоскости. На рис. 9.1 это магнитное поле представлено вектором магнитной индукции \vec{B}_1 . Магнитное поле катушки 2 характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B}_2 . К катушке 1 подводится синусоидальный ток

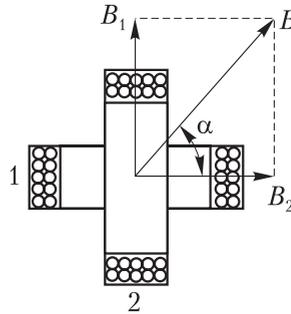


Рис. 9.1

$$i_1 = I_m \sin \omega t,$$

к катушке 2 — ток

$$i_2 = I_m \sin(\omega t + \pi / 2) = I_m \cos \omega t.$$

Индукция магнитного поля пропорциональна создающему его току, следовательно,

$$B_1 = B_m \sin \omega t;$$

$$B_2 = B_m \cos \omega t.$$

Магнитные поля катушек, налагаясь друг на друга, образуют результирующее поле. Модуль вектора индукции результирующего магнитного поля определим из векторной диаграммы по теореме Пифагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Таким образом, индукция результирующего магнитного поля оказывается не зависящей от времени величиной, равной максимальному значению индукции поля одной катушки. Это значит, что магнитные поля первой и второй катушек меняются так согласованно, что результирующее поле остается постоянным по величине.

Направление силовых линий результирующего магнитного поля характеризуется направлением вектора \vec{B} , который образует угол α с горизонтальной осью и определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B_2} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

Отсюда

$$\alpha = \omega t,$$

т.е. вектор \vec{B} вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω , равной угловой частоте синусоидального тока.

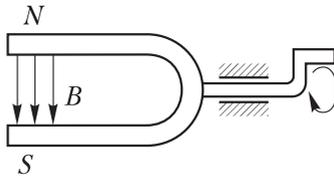


Рис. 9.2

Результирующее магнитное поле катушек можно представить как поле постоянного магнита, который поворачивается в пространстве (рис. 9.2). Такое поле называют вращающимся. Нетрудно убедиться, что результирующее магнитное поле катушек будет вращаться в обратную сторону, если поменять фазы токов.

Карточка № 9.1 (129)

Вращающееся магнитное поле двухфазного тока

Чему равен угол сдвига фаз между токами в двухфазной и трехфазной системах соответственно?	90°; 90°	73
	90°; 120°	4
	180°; 120°	84
	120°; 90°	115
Можно ли получить постоянное по величине магнитное поле, складывая периодически изменяющиеся магнитные поля?	Можно	79
	Нельзя	48
Две катушки, сдвинутые в пространстве на угол 90°, питаются токами: $i_1 = 10 \sin 314 t$, $i_2 = 10 \cos 314 t$. Определите угловую скорость вращения результирующего магнитного поля.	314 рад/с	107
	314 об/с	61
	Для решения задачи недостаточно данных	54
Две катушки, сдвинутые в пространстве на угол 90°, питаются двухфазным током частотой $f = 50$ Гц. Определите скорость вращения результирующего магнитного поля.	314 рад/с	114
	314 об/с	69
	Для решения задачи недостаточно данных	36
Как изменить направление вращения результирующего магнитного поля?	Это невозможно	7
	Изменить порядок следования фаз токов	25

Графическое пояснение процесса образования вращающегося магнитного поля. Изобразим графически с помощью магнитных силовых линий поле двух рассмотренных катушек.

На рис. 9.3 схематически изображен цилиндрический магнитопровод, в пазах которого размещены катушки AX и BY . Буквами A и B обозначены начала, X и Y — концы катушек. Катушка AX питается током i_A , изменяющимся по синусоидальному закону, катушка BY — током i_B , изменяющимся по косинусоидальному закону. Будем считать положительным ток, протекающий от начала катушки к ее концу.

Рассмотрим последовательно несколько моментов времени.

При $t = 0$ ток i_A в катушке AX отсутствует, а ток i_B в катушке BY положителен. Силовые линии, определенные по правилу буравчика, выходят из верхней части магнитопровода и направлены в нижнюю часть аналогично силовым линиям постоянного магнита, изображенного справа, у которого северный полюс расположен вверху, а нижний — внизу.

При $t = t_1$ ток $i_B = 0$, а ток i_A положителен. Силовые линии магнитного поля токов аналогичны силовым линиям постоянного магнита, у которого северный полюс расположен слева, а южный — справа.

При $t = t_2$ ток $i_A = 0$, а ток i_B отрицателен. В этом случае силовые линии магнитного поля токов аналогичны силовым линиям постоянного магнита, у которого северный полюс расположен внизу, а южный — вверху.

Продолжив рассмотрение процессов для других моментов времени, нетрудно убедиться, что за половину периода тока магнитное поле повернется на 180° , а за период сделает полный оборот. Следовательно, число оборотов вращающегося магнитного поля в секунду равно частоте тока f .

Скорость вращения магнитного поля принято измерять числом оборотов в минуту. Тогда

$$n_1 = 60f \text{ [об/мин]}.$$

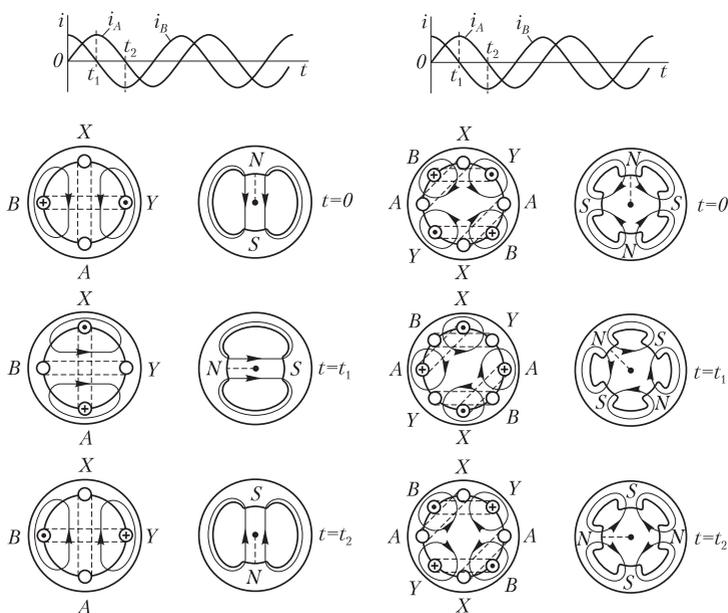


Рис. 9.3

Рис. 9.4

Чтобы понять принцип получения многополюсных вращающихся полей, обратимся к рис. 9.4. Здесь схематически изображен магнитопровод, разделенный на две половины, в каждой из которых размещены катушки $AХ$ и $ВУ$. Таким образом, устройство имеет две катушки $AХ$, питаемые током i_A , и две катушки $ВУ$, питаемые током i_B .

Проводя аналогичные рассуждения, устанавливаем, что магнитное поле токов аналогично полю четырехполюсного постоянного магнита, причем в течение половины периода тока поле делает только четверть оборота, а полный оборот совершает за два периода. Таким образом, увеличение числа пар полюсов в 2 раза уменьшает скорость вращения поля в 2 раза. Легко показать, что увеличение числа пар полюсов в 3 раза уменьшило бы скорость вращения поля в 3 раза, т.е. в общем случае

$$n_1 = 60 f / p,$$

где p — число пар полюсов.

При $p = 1$ эта формула совпадает с предыдущей.

Карточка № 9.2 (237)

Графическое пояснение процесса образования
вращающегося магнитного поля

$i_A = I_m \cos \omega t; i_B = I_m \sin \omega t$. Чему равны токи i_A и i_B в моменты времени: а) $t = T/4$; б) $t = T/2$ (T – период тока)?	а) $i_A = 0; i_B = -I_m$; б) $i_A = -I_m;$ $i_B = 0$	196
	а) $i_A = I_m; i_B = 0$; б) $i_A = 0;$ $i_B = -I_m$	197
	а) $i_A = 0; i_B = I_m$; б) $i_A = -I_m;$ $i_B = 0$	95
	а) $i_A = I_m; i_B = -I_m$; б) $i_A = 0;$ $i_B = 0$	210
Каким правилом опре- деляется направление силовых линий магнит- ного поля, возникающего вокруг проводника с током?	Правилom левой руки	215
	Правилom правой руки	190
	Правилom буравчика	32
Каким полюсом является северный полюс магнита?	В который входят силовые линии поля	141
	Из которого выходят силовые линии поля	6
На какой угол повернет- ся за четверть периода: а) двухполюсное враща- ющееся магнитное поле; б) четырехполюсное вращающееся магнитное поле?	а) 90° ; б) 45°	15
	а) 180° ; б) 90°	143
	а) 45° ; б) 90°	128
	а) 90° ; б) 180°	9
$f = 500$ Гц. Определите скорость вращения: а) двухполюсного враща- ющегося магнитного поля; б) четырехполюсного вращающегося магнитно- го поля.	а) 30 000 об/мин; б) 30 000 об/мин	35
	а) 30 000 об/мин; б) 15 000 об/мин	89
	а) 30 000 об/мин; б) 60 000 об/мин	59

Вращающееся магнитное поле трехфазного тока. Для создания вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной системы токов нужны три катушки, сдвинутые в пространстве на 120° одна относительно другой (рис. 9.5).

Магнитная индукция, создаваемая при этом каждой катушкой, пропорциональна соответствующему току:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_m \sin \omega t; \\ B_2 &= B_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ B_3 &= B_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned}$$

Выберем произвольное направление, повернутое на угол α относительно вектора магнитной индукции \vec{B}_1 (пунктирная ось), и найдем величину вектора результирующей магнитной индукции в этом направлении. С этой целью сложим проекции векторов $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$ на выбранное направление:

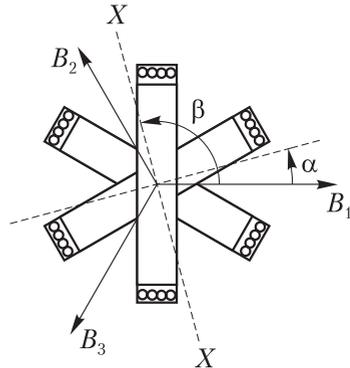


Рис. 9.5

$$B = B_1 \cos \alpha + B_2 \cos(120^\circ - \alpha) + B_3 \cos(120^\circ + \alpha)$$

и подставим выражения для B_1, B_2, B_3 :

$$\begin{aligned} B &= B_m \sin \omega t \cos \alpha + B_m \sin(\omega t - 120^\circ) \cos(120^\circ - \alpha) + \\ &+ B_m \sin(\omega t + 120^\circ) \cos(120^\circ + \alpha). \end{aligned}$$

После тригонометрических преобразований получим

$$\begin{aligned} B &= \frac{B_m}{2} [\sin(\omega t - \alpha) + \sin(\omega t - \alpha) + \sin(\omega t - \alpha)] + \\ &+ \frac{B_m}{2} [\sin(\omega t + \alpha) + \sin(\omega t + \alpha - 240^\circ) + \sin(\omega t + \alpha + 240^\circ)]. \end{aligned}$$

Синусоидально изменяющиеся величины в последней квадратной скобке можно представить системой векторов, изображенной на рис. 9.6. Нетрудно убедиться, что сумма этих векторов равна нулю.

Таким образом,

$$B = \frac{3B_m}{2} \sin(\omega t - \alpha).$$

Пусть угол $\beta = \alpha + 90^\circ$ (рис. 9.5).

Тогда

$$\alpha = \beta - 90^\circ.$$

Положив $\beta = \omega t$, получим

$$\sin(\omega t - \alpha) = \sin(\omega t - \omega t + 90^\circ) = 1;$$

$$B = \frac{3B_m}{2},$$

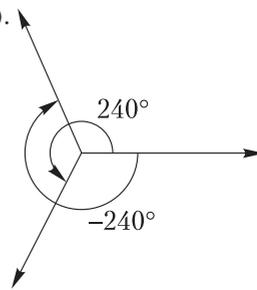


Рис. 9.6

т.е. магнитная индукция вдоль оси XX постоянна, а сама ось XX вращается с угловой скоростью ω .

Направление вращения поля определяется порядком следования фаз. Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами любые две фазы из трех.

В заключение отметим, что для получения неискаженно-го вращающегося магнитного поля система катушек должна быть полностью симметричной, а питающие их токи должны иметь строго одинаковую амплитуду и частоту, а также фазовый сдвиг ровно на 120° один относительно другого.

Карточка № 9.3 (288)

Вращающееся магнитное поле трехфазного тока

$i_1 = I_m \sin \omega t;$ $i_2 = I_m \sin(\omega t + 120^\circ);$ $i_3 = I_m \sin(\omega t - 120^\circ).$	Можно	30
Можно ли с помощью этих токов получить вращающееся магнитное поле?	Нельзя	99
Сколько катушек, питаемых трехфазным током, необходимо для получения шестиполусного вращающегося магнитного поля?	3	102
	6	146
	9	82
	Получить такое поле невозможно	222

Продолжение карт. № 9.3

Шесть катушек, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на 60° , питаются трехфазным током частотой 500 Гц. Определите скорость вращения магнитного поля.	15 000 об/мин	72
	30 000 об/мин	218
	60 000 об/мин	214
Магнитное поле трехфазного тока частотой 50 Гц вращается со скоростью 3000 об/мин. Сколько полюсов имеет это поле?	2	17
	3	184
	6	179
Как изменить направление вращения магнитного поля трехфазного тока?	Это невозможно	170
	Нужно поменять местами все три фазы	138
	Нужно поменять местами две любые фазы	87

9.2. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель является простейшей из электрических машин. Как и любая электрическая машина, он имеет две основные части — статор и ротор (рис. 9.7).

Статор состоит из чугунной станины 1 в которой закреплен магнитопровод (сердечник) в виде полого цилиндра 2. Между станиной и сердечником обычно оставляют зазор, через который проходит охлаждающий воздух. Для уменьшения потерь на вихревые токи сердечник статора набирают из тонких (0,5 мм) листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. В пазы, вырезанные по внутренней окружности статора, укладывают обмотку 3. У двухполюсной машины обмотка статора состоит из трех катушек, сдвинутых на углы 120° , у четырехполюсной — из шести катушек, сдвинутых на 60° , у шестиполюсной — из девяти катушек и т.д. Обмотку в пазах статора закрепляют клиньями.

Ротор также набирают из тонких листов электротехнической стали. В пазах ротора размещают обмотку, которая может быть короткозамкнутой (рис. 9.8, а) или фазной (рис. 9.8, б). Короткозамкнутая обмотка типа «беличьей

клетки» изображена на рис. 9.9. Она состоит из толстых проводящих стержней (медь, алюминий), соединенных по торцам медными или алюминиевыми кольцами. Короткозамкнутая обмотка не изолируется от ротора. Иногда ее изготавливают заливкой расплавленного алюминия в пазы ротора.

Устройство фазной обмотки ротора аналогично устройству обмотки статора. Концы фазной обмотки ротора соединяют с контактными кольцами 1 и через щетки 2 соединяют с регулировочными или пусковыми реостатами 3 (рис. 9.10). Контактные кольца, изготовленные из латуни или меди, укрепляют на валу двигателя с помощью изолирующих прокладок. Щеткодержатель с угольными или медно-графитовыми щетками крепят на подшипниковом щите.

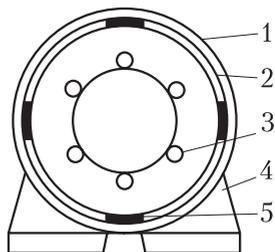


Рис. 9.7

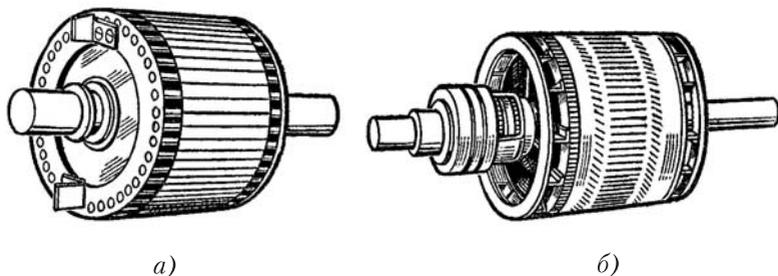


Рис. 9.8

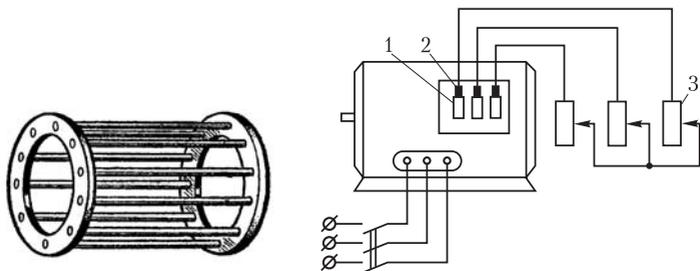


Рис. 9.9

Рис. 9.10

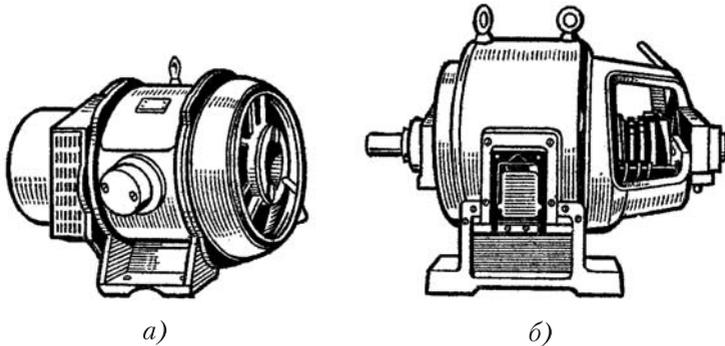


Рис. 9.11

Общий вид асинхронного двигателя с короткозамкнутой (а) и фазной (б) обмотками ротора показан на рис. 9.11

Карточка № 9.4 (184)

Устройство асинхронного двигателя

Назовите основные части асинхронного двигателя.	Станина, сердечник, обмотка статора, ротор	112
	Станина, сердечник, обмотка ротора, ротор	23
Почему сердечник статора и ротор набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком?	Для уменьшения потерь на вихревые токи	110
	Для уменьшения потерь на перемагничивание	3
Какие материалы используют для изготовления короткозамкнутой обмотки ротора?	Алюминий	74
	Алюминий, медь	177
	Медь, электротехническую сталь	92
Чем отличается асинхронный двигатель с фазной обмоткой ротора от двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора?	Наличием контактных колец и щеток	153
	Наличием зазора для охлаждающего воздуха	83
	Числом катушек статора	116

Продолжение карт. № 9.4

С какой целью асинхронный двигатель с фазной обмоткой ротора снабжают контактными кольцами и щетками?	Для подключения двигателя к сети	120
	Для соединения ротора с регулировочными реостатами	132

9.3. Принцип действия асинхронного двигателя. Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля и основных законов электротехники.

При включении двигателя в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают стержни или катушки обмотки ротора. При этом согласно закону электромагнитной индукции в обмотке ротора индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости пересечения силовых линий. Под действием индуцированной ЭДС в короткозамкнутом роторе возникают значительные токи.

В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуцированный ток, т.е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями вращающегося поля. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки ротора магнитными силовыми линиями.

Достичь скорости вращения поля в реальных условиях ротор не может, так как тогда стержни его обмотки оказались бы неподвижными относительно магнитных силовых линий и исчезли бы индуцированные токи в обмотке ротора. Поэтому ротор вращается со скоростью, меньшей скорости вращения поля, т.е. несинхронно с полем, или асинхронно.

Если силы, тормозящие вращение ротора, невелики, то ротор достигает скорости, близкой к скорости вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя скорость вращения ротора уменьшается, токи в обмотке ротора увеличиваются, что приводит к увеличению вращающего момента двигателя. При некоторой скорости вращения ротора устанавливается равновесие между тормозным и вращающим моментами.

Карточка № 9.5 (213)

Принцип действия асинхронного двигателя. Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора

Какова скорость пересечения силовыми линиями магнитного поля стержней обмотки неподвижного ротора?	Максимальна	124
	Минимальна	65
	Равна нулю	45
Какова скорость пересечения силовыми линиями магнитного поля стержней обмотки ротора двигателя в режиме холостого хода?	Максимальна	49
	Минимальна	224
	Равна нулю	60
Может ли ротор асинхронного двигателя раскрутиться до скорости вращения магнитного поля?	Может	161
	Не может	55
Как изменится ток в обмотке ротора при увеличении механической нагрузки на валу двигателя?	Увеличится	158
	Не изменится	8
	Уменьшится	20
Чему равнялся бы ток в обмотке ротора, если бы ротор вращался со скоростью вращения магнитного поля?	Максимальному значению	129
	Нулю	52

9.4. Скольжение и скорость вращения ротора

Обозначим через n_2 — скорость вращения ротора асинхронного двигателя. Было установлено, что n_2 всегда меньше n_1 .

Скорость вращения магнитного поля относительно ротора, т.е. разность $(n_1 - n_2)$, называют *скольжением*. Обычно

скольжение выражают в долях скорости вращения поля и обозначают буквой s :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Скольжение зависит от нагрузки двигателя. При номинальной нагрузке его величина составляет около 0,05 — у машин небольшой мощности и около 0,02 — у мощных машин.

Из последнего равенства находим, что

$$n_2 = (1-s)n_1.$$

После преобразования получаем выражение скорости двигателя, удобное для дальнейших рассуждений:

$$n_2 = (1-s) \frac{60f}{p} \text{ [об/мин]}.$$

Поскольку при нормальном режиме работы двигателя скольжение невелико, скорость двигателя мало отличается от скорости вращения поля.

На практике скольжение часто выражают в процентах:

$$s, \% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100.$$

У большинства асинхронных двигателей скольжение колеблется в пределах 2—5%.

Скольжение является одной из важнейших характеристик двигателя: через него выражаются ЭДС и ток ротора, вращающий момент, скорость вращения ротора.

При неподвижном роторе ($n_2 = 0$) скольжение равно единице. Таким скольжением обладает двигатель в момент пуска.

Как отмечалось, скольжение зависит от момента нагрузки на валу двигателя, следовательно, и скорость вращения ротора зависит от величины тормозного момента на валу. Номинальное значение скорости ротора n_2 соответствующее расчетным значениям нагрузки, частоты и напряжения сети, указывается на заводском щитке асинхронного двигателя.

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы. При $0 < s \leq 1$ машина работает в режиме двигателя, скорость вращения ротора n_2 меньше или равна скорости вращения магнитного поля статора n_1 . Но если внешним двигателем раскрутить ротор до скорости, большей синхронной скорости $n_2 > n_1$, то машина перейдет в режим генератора переменного тока. При этом скольжение станет отрицательным, а механическая энергия приводного двигателя будет превращаться в электрическую энергию.

Асинхронные генераторы переменного тока практически применяются очень редко.

Карточка № 9.6 (174)

Скольжение и скорость вращения ротора

Скорость вращения поля статора 3000 об/мин. Скорость вращения ротора 2940 об/мин. Определите скольжение.	2%	68
	Для решения задачи недостаточно данных	185
	20%	216
Три катушки обмотки статора питаются трехфазным током частотой $f = 500$ Гц. Скорость вращения ротора 28 500 об/мин. Определите скольжение.	Для решения задачи недостаточно данных	226
	5%	37
	20%	176
$s = 0,05$; $p = 1$; $f = 50$ Гц. Определите скорость вращения ротора.	3000 об/мин	169
	1425 об/мин	165
	2850 об/мин	26
$s = 0,05$; $f = 50$ Гц. Вращающееся магнитное поле статора является шестиполосным. Определите скорость вращения ротора.	2850 об/мин	159
	1425 об/мин	127
	950 об/мин	10
Как изменится скольжение, если увеличить момент нагрузки на валу двигателя?	Увеличится	33
	Не изменится	63
	Уменьшится	142

9.5. Влияние скольжения на ЭДС в обмотке ротора

Условия индуктирования ЭДС в обмотках трансформатора и асинхронной машины одинаковы, а все закономерности идентичны. Действительно, в трансформаторе витки обмотки пересекаются магнитным потоком переменной величины, не меняющим своего направления в пространстве. В асинхронной машине витки обмотки пересекаются постоянным по величине, но вращающимся магнитным потоком. С точки зрения закона электромагнитной индукции важно отметить, что в обоих случаях магнитный поток, сцепленный с каждым витком обмотки, изменяется во времени по синусоидальному закону.

Обозначим действующее значение ЭДС одной фазы неподвижного ротора $E_{2н}$. Тогда формула трансформаторной ЭДС примет вид

$$E_{2н} = 4,44\omega_2 k_2 f_1 \Phi,$$

где ω_2 — число витков одной фазы обмотки ротора; k_2 — обмоточный коэффициент ротора; f_1 — частота тока питающей сети; Φ — вращающийся магнитный поток.

Обмоточный коэффициент всегда меньше единицы и в современных асинхронных машинах составляет 0,85–0,95. Он обусловлен тем, что в машине переменного тока витки обмотки распределены по внутренней поверхности статора и не одновременно пересекаются магнитным потоком. Поэтому ЭДС отдельных витков несколько сдвинуты по фазе относительно друг друга и складываются не арифметически, как в трансформаторе, а геометрически. Сложение ЭДС отдельных витков в трансформаторе (а) и в машине переменного тока (б) показано на рис. 9.12.

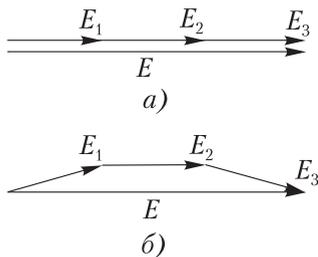


Рис. 9.12

При неподвижном роторе частота индуктируемой в его обмотке ЭДС равна частоте сети f_1 . По мере раскручивания ротора скорость $(n_1 - n_2)$ пересечения витков обмотки вращающимся магнитным полем уменьшается, а следовательно, уменьшается частота ЭДС в обмотке ротора:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Чтобы ввести скольжение, умножим числитель и знаменатель на n_1 :

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)n_1}{60n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \frac{pn_1}{60} = sf_1.$$

Таким образом, частота ЭДС в обмотке ротора прямо пропорциональна скольжению.

Теперь можно записать выражение ЭДС обмотки ротора в общем случае:

$$E_2 = 4,44\omega_2 k_2 f_2 \Phi = 4,44\omega_2 k_2 s f_1 \Phi.$$

Сравнивая выражения для $E_{2н}$ и E_2 , находим, что

$$E_2 = sE_{2н}.$$

Величина ЭДС E_2 , индуцируемой в обмотке ротора вращающимся магнитным полем, прямо пропорциональна скольжению двигателя.

Карточка № 9.7 (204)

Влияние скольжения на ЭДС в обмотке ротора

Можно ли использовать асинхронный двигатель в качестве трансформатора?	Можно	57
	Нельзя	111
Ротор асинхронного двигателя неподвижен. Как изменится величина ЭДС, индуцируемой в обмотке ротора, при увеличении в 2 раза частоты тока питающей сети?	Не изменится	151
	Увеличится в 2 раза	147
	Увеличится в 4 раза	134
Ротор асинхронного двигателя имеет скорость вращения 60 об/мин относительно скорости вращения магнитного поля. Определите частоту тока в обмотке ротора при $p = 1$.	60 Гц	86
	1 Гц	18
	Для решения задачи недостаточно данных	40

Продолжение карт. № 9.4

Частота тока питающей сети 50 Гц. Ротор асинхронного двигателя вращается со скольжением, равным 2%. Определите частоту тока в обмотке ротора.	50 Гц	77
	1 Гц	81
	Для решения задачи недостаточно данных	31
При скольжении 2% в одной фазе обмотки ротора индуцируется ЭДС 1 В. Чему будет равна эта ЭДС при неподвижном роторе?	0	90
	1 В	193
	50 В	201

9.6. Зависимость величины и фазы тока от скольжения и ЭДС ротора

В трансформаторе ЭДС вторичной обмотки создает напряжение на нагрузке и преодолевает внутреннее падение напряжения. В асинхронном двигателе обмотка ротора замкнута накоротко, поэтому ЭДС E_2 расходуется в собственном активном и индуктивном сопротивлениях обмотки.

В двигателе с фазным ротором активное сопротивление обмотки ротора может изменяться за счет включения регулировочных реостатов. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора определяется по известной формуле $x_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2$ и зависит от скольжения. Действительно,

$$f_2 = s f_1; \quad x_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s \omega_1 L_2.$$

Величина $\omega_1 L_2$ представляет собой индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора x_{2H} , следовательно,

$$x_2 = s x_{2H}.$$

На основании закона Ома для цепи переменного тока можно написать

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + x_2^2}}.$$

Здесь E_2 и x_2 меняются при изменении скорости вращения двигателя. Целесообразно выразить ток I_2 через неизменные величины и скольжение:

$$I_2 = \frac{sE_{2н}}{\sqrt{R_2^2 + (sx_{2н})^2}} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + x_{2н}^2}}.$$

Отсюда очевидно, что ток в обмотке неподвижного ротора ($s = 1$) имеет наибольшее значение:

$$I_2 = \frac{E_{2н}}{\sqrt{R_2^2 + x_{2н}^2}}.$$

По мере раскручивания ротора скольжение уменьшается, стремясь к нулю, ток в роторе также уменьшается и при синхронной скорости становится равным нулю:

$$s = 0; I_2 = 0.$$

Угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора может быть определен по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x_2}{R_2} = \frac{s x_{2н}}{R_2}.$$

Величины $x_{2н} = \omega_1 L_2$ и R_2 не зависят от скорости вращения двигателя, поэтому $\operatorname{tg} \varphi_2$ пропорционален скольжению двигателя.

При неподвижном роторе (в момент пуска), когда $s = 1$, ток и ЭДС ротора сдвинуты по фазе на максимальный угол:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = x_{2н} / R_2.$$

По мере раскручивания ротора сдвиг по фазе между I_2 и E_2 уменьшается. При $s = 0$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.$$

Для определения φ_2 можно воспользоваться также формулой

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + x_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s x_{2H})^2}}.$$

Карточка № 9.8 (190)

Зависимость величины и фазы тока от скольжения и ЭДС ротора

Активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки неподвижного ротора равны 10 Ом каждое. Чему равны эти величины при скольжении $s = 10\%$?	$R_2 = 10$ Ом; $x_2 = 10$ Ом	187
	$R_2 = 1$ Ом; $x_2 = 10$ Ом	149
	$R_2 = 10$ Ом; $x_2 = 1$ Ом	135
В предыдущем случае в фазе обмотки неподвижного ротора индуцируется ЭДС $100\sqrt{2}$ В. Чему равен ток?	1 А	108
	10 А	14
	$10\sqrt{2}$ А	2
Как будет изменяться ток в обмотке ротора по мере раскручивания ротора?	Увеличится	12
	Уменьшится	130
	Останется неизменным	157
Чему равен угол сдвига фаз между ЭДС и током в обмотке неподвижного ротора с параметрами, указанными выше?	45°	167
	0	173
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	122
Как будет изменяться угол сдвига фаз между ЭДС и током в обмотке ротора по мере раскручивания ротора?	Увеличится	53
	Уменьшится	44
	Останется неизменным	91

9.7. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент любого электрического двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля и проводников с током. В двигателе постоянного тока вращающий момент выражается формулой

$$M = c_M I \Phi.$$

В асинхронном двигателе вращающий момент выражается аналогичной формулой. Нужно только установить, какое значение тока должно быть использовано. Полный ток I_2 в обмотке ротора состоит из активной $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$ и реактивной $I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2$ составляющих. Допустим, что активная составляющая тока ротора равна нулю. Тогда, несмотря на наличие ЭДС E_2 и тока I_2 в обмотке ротора, активная мощность этой обмотки равнялась бы нулю. Но ротор, не потребляющий активной мощности, не может создавать вращающего момента, так как момент $M = P/\omega$ и равен нулю при $P = 0$. Следовательно, реактивная составляющая тока ротора не участвует в создании вращающего момента и можно написать

$$M = c \Phi I_2 \cos \varphi_2,$$

т.е. вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален результирующему магнитному потоку и активной составляющей тока в обмотке ротора. Коэффициент пропорциональности c зависит от конструктивных параметров двигателя.

Важно установить, как зависит вращающий момент от скольжения двигателя. Подставим в формулу момента значения I_2 и $\cos \varphi_2$:

$$M = c \Phi \frac{s E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + (s x_{2H})^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s x_{2H})^2}} = c \Phi \frac{E_{2H} R_2}{\frac{R_2^2}{s} + s x_{2H}^2}.$$

Как и следовало ожидать, при $s = 0$ вращающий момент исчезает. При $s = \infty$ вращающий момент также обращается в нуль. Таким образом, с увеличением скольжения от нуля вращающий момент увеличивается, достигает максимума, а с дальнейшим возрастанием s до бесконечности снова стре-

мится к нулю. Задаваясь различными значениями скольжения, можно построить график зависимости $M(s)$, который представлен на рис. 9.13. На графике выделены три момента: номинальный вращающий момент M_n , максимальный момент M_{\max} и пусковой момент M_p . Номинальный момент обычно соответствует скольжению $s = 3\text{--}5\%$, максимальный момент — $10\text{--}14\%$, пусковой момент — 100% . Обычно асинхронный двигатель рассчитывают так, чтобы максимальный момент в 2–3 раза превышал номинальный, а пусковой момент примерно равнялся номинальному. Небольшое значение пускового момента — один из существенных недостатков асинхронного двигателя.

Максимальный вращающий момент разбивает кривую $M(s)$ на два участка. Участок от 0 до точки A соответствует устойчивым режимам работы асинхронного двигателя; с увеличением момента нагрузки скорость вращения двигателя замедляется, скольжение увеличивается и, как очевидно из графика, возрастает вращающий момент. Новое положение равновесия достигается, когда вращающий момент становится равным тормозному. При этом двигатель устойчиво вращается с уменьшенной скоростью.

Участок за точкой A соответствует неустойчивым режимам работы двигателя: с увеличением момента нагрузки скольжение увеличивается, вращающий момент уменьшается, скольжение возрастает еще больше и т.д. Двигатель останавливается и начинает быстро нагреваться, так как при $s = 1$ его пусковой ток в 6–7 раз превышает номинальное значение.

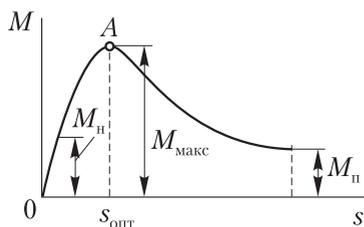


Рис. 9.13

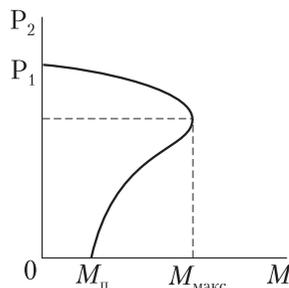


Рис. 9.14

Зависимость скорости вращения двигателя n_2 от момента на валу M при постоянных напряжении питания и часто-

те сети называется *механической характеристикой* (рис. 9.14). Она может быть снята экспериментально и легко получена на основании графика $M(s)$. С увеличением момента нагрузки скорость вращения двигателя уменьшается незначительно. Если момент нагрузки превысит максимальный момент, то скорость вращения двигателя лавинообразно уменьшится до нуля.

Скорость вращения асинхронного двигателя существенно зависит от напряжения питания. Можно показать, что вращающий момент M пропорционален квадрату напряжения питания. Поэтому даже небольшие колебания напряжения питания приводят к заметному изменению вращающего момента и скорости вращения двигателя.

Карточка № 9.9 (168)

Вращающий момент асинхронного двигателя

Как изменяется вращающий момент асинхронного двигателя при увеличении скольжения от нуля до единицы?	Уменьшается	191
	Увеличивается	199
	Сначала увеличивается, затем уменьшается	29
	Сначала уменьшается, затем увеличивается	155
Что произойдет, если тормозной момент на валу асинхронного двигателя превысит максимальный вращающий момент?	Скольжение уменьшится до нуля	101
	Скольжение увеличится до единицы	21
	Скольжение будет равно оптимальному значению	119
Чему равен вращающий момент асинхронного двигателя при: а) $s = 0$; б) $s = 1$?	а) 0; б) M_n	28
	а) 0; б) 0	117
	а) M_n ; б) 0	42
Чему равен вращающий момент асинхронного двигателя при $s = s_{\text{опт}}$?	0	56
	M_n	162
	M_n	171
	$M_{\text{макс}}$	70

Продолжение карт. № 9.9

Напряжение на зажимах асинхронного двигателя уменьшилось в 2 раза. Как изменится его вращающий момент?	Не изменится	203
	Уменьшится в 2 раза	209
	Уменьшится в 4 раза	220

9.8. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму зависимости вращающего момента от скольжения

Для изучения особенностей пуска асинхронного двигателя и регулирования его скорости вращения полезно исследовать, каким образом активное сопротивление обмотки ротора влияет на форму зависимости $M(s)$.

Было установлено, что зависимость вращающего момента от скольжения выражается формулой

$$M = c\Phi \frac{E_{2н} R_2}{R_2^2 / s + s x_{2н}^2}$$

Вращающий момент M достигает максимума, когда знаменатель формулы $R_2^2 / s + s x_{2н}^2$ достигает минимума.

Знаменатель представляет собой сумму двух членов. Первый член с увеличением скольжения уменьшается, второй — увеличивается. Из непосредственных вычислений, задаваясь числовыми значениями s , можно убедиться, что сумма имеет минимальное значение, когда первый ее член равен второму: $R_2^2 / s + s x_{2н}^2$. При этом скольжение $s = R_2 / x_{2н}$. Назовем это скольжение оптимальным и обозначим $s_{\text{опт}}$, так как оно соответствует минимуму знаменателя формулы и максимуму вращающего момента.

Оптимальное скольжение можно найти и известными из математики методами. Для этого нужно исследовать на экстремум функцию $f(s) = R_2^2 / s + s x_{2н}^2$.

Применяя правило Лопиталя, получаем

$$df / ds = -R_2^2 / s^2 + x_{2н}^2 = 0,$$

откуда

$$s_{\text{опт}} = R_2 / x_{2н}.$$

Таким образом, оптимальное скольжение асинхронного двигателя прямо пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора. Изменяя активное сопротивление обмотки ротора R_2 , можно менять положение максимума кривой $M(s)$, как показано на рис. 9.15.

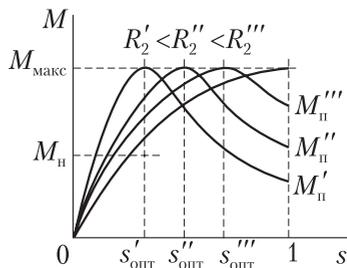


Рис. 9.15

При увеличении сопротивления R_2 максимум кривой сдвигается в сторону больших значений скольжения, при этом и вся кривая сдвигается вправо.

Максимальный вращающий момент двигателя можно найти, если в формулу момента подставить оптимальное значение скольжения $s_{\text{опт}} = R_2 / x_{2\text{H}}$:

$$M_{\text{макс}} = c \Phi \frac{E_{2\text{H}} R_2}{\frac{R_2^2 x_{2\text{H}}^2}{R_2} + \frac{R_2 x_{2\text{H}}^2}{x_{2\text{H}}}} = c \Phi \frac{E_{2\text{H}}}{2x_{2\text{H}}}.$$

Отсюда очевидно, что максимальный вращающий момент не зависит от активного сопротивления обмотки ротора.

Карточка № 9.10 (176)

Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму зависимости вращающего момента от скольжения

$R_2^2 = x_{2\text{H}}^2 = 10 \text{ Ом}$ При каком значении s сумма $R_2^2 / s + s x_{2\text{H}}^2$ минимальна?	$s = 2$	194
	$s = 1$	160
	$s = 0,5$	38
Индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора в 10 раз превышает ее активное сопротивление. При каком скольжении двигатель развивает максимальный вращающий момент?	Для решения задачи недостаточно данных	67
	10%	1
	2%	51

Продолжение карт. № 9.10

В предыдущем случае активное сопротивление обмотки ротора увеличили в 2 раза. При каком скольжении вращающий момент двигателя будет максимальным?	5%	126
	10%	150
	20%	145
Во сколько раз надо увеличить активное сопротивление обмотки ротора, чтобы двигатель с указанными характеристиками развивал максимальный пусковой момент?	В 10 раз	123
	В 2 раза	11
Активное сопротивление обмотки ротора увеличили в 2 раза. Как изменится максимальный вращающий момент двигателя при прочих равных условиях?	Не изменится	47
	Увеличится в 2 раза	208
	Увеличится в 4 раза	200

9.9. Пуск асинхронного двигателя

Прежде чем включить асинхронный двигатель в сеть, нужно установить схему соединения его обмоток, соответствующую номинальному режиму работы.

Предположим, что линейное напряжение сети 220 В, а в паспорте двигателя указано напряжение 220/380 В. При этих условиях обмотки надо соединить треугольником, чтобы напряжение на них соответствовало расчетному.

На практике при пуске асинхронного двигателя для ограничения пусковых токов его обмотки кратковременно соединяют звездой. Переключение с треугольника на звезду и обратно осуществляют специальным переключателем. Отметим, что такое переключение не производится, если рассматриваемый двигатель включается в сеть с линейным напряжением 380 В. В этом случае его обмотки и при пуске, и при номинальном режиме работы должны быть соединены звездой.

Как было отмечено, пусковой момент асинхронного двигателя невелик, поэтому пуск обычно производят при отключенной нагрузке.

Под действием пускового момента ротор начинает раскручиваться, скольжение уменьшается, вращающий момент возрастает (см. рис. 9.13), двигатель быстро проходит участок, соответствующий неустойчивому режиму работы (участок от 1 до $s_{\text{опт}}$), и переходит на участок, соответствующий устойчивому режиму. Здесь увеличению скорости вращения ротора соответствует уменьшение вращающего момента, поэтому рост скорости быстро прекратится. Ротор устойчиво вращается со скоростью, несколько меньшей скорости поля. Теперь с помощью фрикционной муфты можно включить нагрузку. Момент нагрузки не должен превышать максимальный момент.

Если по условиям эксплуатации двигатель должен запускаться при включенной нагрузке, то его следует рассчитать так, чтобы пусковой момент превышал момент нагрузки при номинальном режиме.

В предыдущем параграфе было показано, что, изменяя активное сопротивление обмотки ротора, можно менять форму зависимости $M(s)$ и величину пускового момента. В частности, сопротивление R_2 можно подобрать таким, что максимум вращающего момента будет соответствовать $s = 1$, т.е. пусковой момент будет равен максимальному моменту асинхронного двигателя.

У двигателей с фазным ротором пусковой момент увеличивают с помощью пускового реостата, включенного в цепь обмотки ротора (рис. 9.16), у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора — за счет перераспределения плотности тока в стержнях обмотки при пусковом и номинальном режимах работы.

На практике применяются два типа двигателей с искусственно увеличенным пусковым моментом. Первый тип — двигатели с двойной «беличьей клеткой» ротора — рассчитывают обычно на большие мощности. Второй тип — двигатели с глубоким пазом ротора — получили наибольшее распространение. Стержни короткозамкнутой обмотки таких двигателей имеют вид узких пластин, глубоко врезанных в ротор. Короткозамкнутые двигатели небольшой мощности с увеличенным пусковым моментом включают в сеть непосредственно (без пусковых реостатов и переключателей).

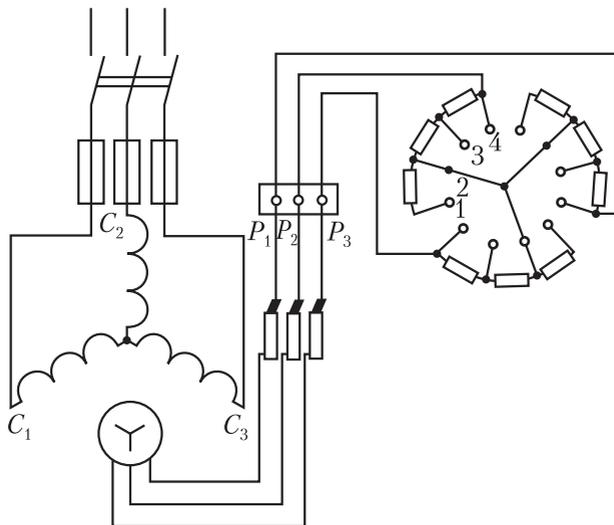


Рис. 9.16

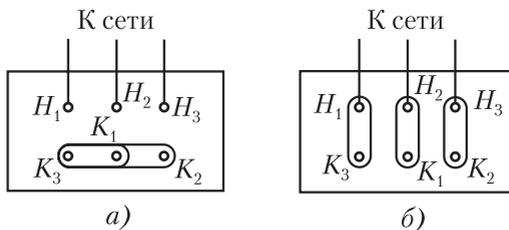


Рис. 9.17

На рис. 9.17 показана клеммовая колодка асинхронного двигателя при соединении обмоток статора звездой (а) и треугольником (б).

Карточка № 9.11 (309)

Пуск асинхронного двигателя

Напряжение сети 220 В. В паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 127/220 В. Как должны быть соединены обмотки статора двигателя при номинальном режиме?	Треугольником	195
	Звездой	78

Продолжение карт. № 9.11

Напряжение сети 127 В. В паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 127/220 В. Как должны быть соединены обмотки статора двигателя: а) при пуске; б) при номинальном режиме?	а) Звездой; б) треугольником	93
	а) Звездой; б) то же	188
	а) Треугольником; б) то же	148
	а) Треугольником; б) звездой	136
При $s = 1$ вращающий момент равен $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, момент нагрузки на валу двигателя $1,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, опрокидывающий момент $2 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Можно ли запустить этот двигатель под нагрузкой?	Можно	105
	Нельзя	121
Рассмотренный двигатель раскрутили на холостом ходу (без нагрузки) до $s < s_{\text{опт}}$. Укажите максимальный момент нагрузки на валу, при котором двигатель не остановится?	$1 \text{ Н} \cdot \text{м}$	97
	$2 \text{ Н} \cdot \text{м}$	41
	$3 \text{ Н} \cdot \text{м}$	24
Какие меры принимают для увеличения пускового момента у двигателя с фазным ротором?	Применяют ротор с двойной «беличьей клеткой»	100
	Применяют ротор с глубоким пазом	205
	В цепь обмотки ротора вводят пусковые реостаты	76

9.10. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

Современные асинхронные двигатели не имеют простых и экономичных устройств для плавного регулирования скорости вращения ротора. Этот существенный недостаток ограничивает область их применения и позволяет двигателям постоянного тока во многих случаях успешно конкурировать с асинхронными двигателями.

Из выведенной формулы скорости вращения асинхронного двигателя очевидно, что скорость n_2 можно регулировать, изменяя скольжение s , число пар полюсов p или частоту питающего напряжения f .

Плавное регулирование скорости вращения двигателя путем изменения скольжения применимо только в двигателях с фазным ротором. Из рис. 9.15 очевидно, что скольжение при неизменном моменте нагрузки зависит от активного сопротивления обмотки ротора. Поэтому в цепь этой обмотки с помощью контактных колец и щеток включают регулировочный реостат, которым плавно изменяют сопротивление обмотки, скольжение и скорость вращения двигателя. Этот способ связан с большими тепловыми потерями. При $s = 0,5$ половина энергии, передаваемой в ротор вращающимся магнитным полем, расходуется на нагрев ротора и регулировочного реостата. Кроме того, наличие колец и щеток усложняет эксплуатацию машины и резко снижает ее надежность.

Величину скольжения, а следовательно, и скорость вращения двигателя в небольших пределах можно регулировать изменением напряжения, подводимого к двигателю.

Ступенчатое регулирование скорости вращения можно осуществлять изменением числа пар полюсов статора двигателя за счет переключения секций его обмотки. Однако этот экономичный и сравнительно простой способ не позволяет регулировать скорость вращения двигателя плавно. Промышленность выпускает двигатели, скорость вращения которых можно регулировать степенями в 2, 3 и 4 раза.

Скорость вращения двигателя можно регулировать также изменением частоты питающего тока, но этот способ практически не применяется ввиду отсутствия простых и экономичных устройств для регулирования частоты тока в мощных электрических цепях. Частота тока определяется скоростью вращения ротора генератора, которую при параллельной работе генераторов необходимо поддерживать строго постоянной. Таким образом, способ требует отдельного генератора для каждого двигателя, что нецелесообразно.

Разработка и промышленное освоение мощных управляемых полупроводниковых диодов позволяет создать статические устройства с выходным напряжением, частоту которого можно регулировать. Эти простые, экономичные и надежные преобразователи частоты для регулирования скорости вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей

значительно упрощают привод различных механизмов: отпадает необходимость в редукторах, коробках скоростей, трансмиссиях. Значение подобных мероприятий в масштабе государства трудно переоценить.

В некоторых случаях возникает необходимость регулировать не только величину скорости, но и направление вращения двигателя. Изменение направления вращения ротора двигателя называют *реверсированием*.

Для реверсирования двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора. При рассмотрении вращающегося магнитного поля было установлено, что направление его вращения определяется порядком чередования фаз.

Поэтому для реверсирования двигателя достаточно поменять местами две любые фазы на клеммовой колодке двигателя.

Если реверсирование приходится применять часто, собирают схему со специальным переключателем (рис. 9.18).

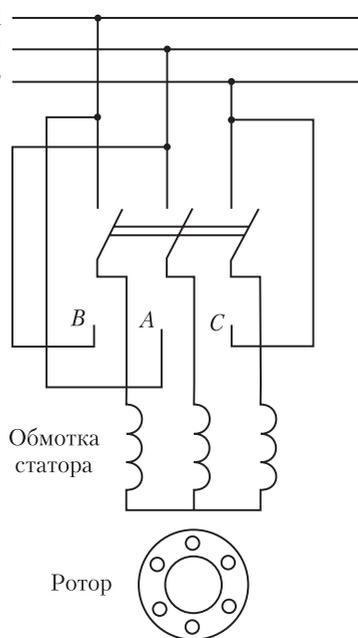


Рис. 9.18

Карточка № 9.12 (250)

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

Укажите основной недостаток асинхронного двигателя.	Зависимость скорости вращения от момента нагрузки на валу двигателя	204
	Отсутствие экономичных устройств для плавного регулирования скорости вращения ротора	34
	Низкий коэффициент полезного действия	198

Продолжение карт. № 9.12

Можно ли плавно и в широких пределах регулировать скорость вращения асинхронного двигателя изменением частоты питающего тока?	Можно	62
	Нельзя	183
Каким образом осуществляют плавное регулирование в широких пределах скорости вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?	Изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора	178
	Изменением сопротивления цепи обмотки ротора	174
	Скорость плавно не регулируется	58
Каким образом осуществляют плавное регулирование скорости вращения асинхронного двигателя с фазным ротором?	Изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора	140
	Изменением сопротивления цепи обмотки ротора	50
	Скорость плавно не регулируется	101
Каким образом осуществляют ступенчатое регулирование скорости вращения асинхронного двигателя?	Переключением секций обмотки статора	46
	Изменением сопротивления цепи обмотки ротора	98

9.11. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронного двигателя

Потери энергии в асинхронном двигателе складываются из потерь в обмотках статора и ротора, потерь в магнитопроводе, механических и добавочных потерь.

Потери в обмотках P_m (потери в меди) пропорциональны квадрату силы тока и существенно изменяются при изменении нагрузки двигателя. Потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе P_c (потери в стали) практически не

зависят от нагрузки, так как магнитный поток асинхронного двигателя при изменении нагрузки почти не меняется. Механические потери $P_{\text{мех}}$ обусловлены трением в подшипниках и о воздух вращающихся частей двигателя. Добавочные потери $P_{\text{доб}}$ определяются пульсациями магнитного потока вследствие зубчатого строения сердечника якоря и другими трудно учитываемыми факторами. Добавочные потери невелики и составляют при номинальной нагрузке около половины процента от подводимой мощности.

Для определения потерь ставят опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя. В опыте холостого хода определяют потери в стали и механические потери:

$$P_0 = P_c + P_{\text{мех}}.$$

Мощность холостого хода P_0 измеряется ваттметром, подключенным к зажимам питания электродвигателя.

Опыт короткого замыкания проводят при неподвижном роторе и пониженном напряжении питания. В опыте короткого замыкания определяют потери в меди:

$$P_k = P_m.$$

Мощность короткого замыкания P_k также измеряется ваттметром. КПД двигателя определяют по формуле

$$\eta = \frac{P_1 - (P_m + P_c + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}})}{P_1},$$

где P_1 — мощность, потребляемая двигателем из сети.

КПД асинхронного двигателя зависит от нагрузки. При номинальном режиме его значение лежит в пределах 0,9–0,95. Чем больше расчетная мощность двигателя, тем выше его КПД.

Важной характеристикой асинхронного двигателя является его коэффициент мощности $\cos \varphi$. Он показывает, какая часть полной мощности, поступающей из сети, расходуется на покрытие потерь и преобразуется в механическую работу. Коэффициент мощности асинхронного двигателя зависит от нагрузки, достигая значений 0,7–0,9 при номинальном режиме работы и снижаясь до 0,2–0,3 при холостом ходе.

Низкое значение $\cos \varphi$ асинхронного двигателя объясняется тем, что для создания магнитного потока в магнитопроводе с воздушными зазорами необходим большой намагничивающий ток, который является реактивным и с увеличением воздушного зазора возрастает. Конструктивный выбор величины воздушного зазора зависит от многих причин: жесткости вала, его центровки, допустимого износа подшипников и др. У мощных машин воздушный зазор относительно других размеров магнитопровода меньше, чем у машин малой мощности. Поэтому у мощных асинхронных двигателей $\cos \varphi$ обычно больше, чем у машин малой мощности.

При низком $\cos \varphi$ сеть загружается реактивными токами и не может обеспечить питание расчетного числа потребителей. Поэтому при эксплуатации асинхронного двигателя следует стремиться к повышению его $\cos \varphi$, в частности, обеспечивать двигатель полезной нагрузкой, близкой к номинальной.

Карточка № 9.13 (252)

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронного двигателя

Как изменяются при увеличении нагрузки асинхронного двигателя: а) потери в меди; б) потери в стали?	а) Увеличиваются; б) увеличиваются	104
	а) Увеличиваются; б) не изменяются	137
	а) Не изменяются; б) увеличиваются	144
Ваттметр, подключенный к зажимам питания асинхронного двигателя, показывает: при номинальной нагрузке 1 кВт, при холостом ходе 50 Вт, при коротком замыкании 50 Вт. Определите КПД двигателя.	Для решения задачи недостаточно данных	189
	90%	192
	95%	213

Продолжение карт. № 9.13

Чему равен КПД двигателя, работающего в режиме холостого хода?	0	225
	90%	227
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	139
На какую мощность должен быть рассчитан генератор, питающий асинхронный двигатель, который развивает на валу механическую мощность 5 кВт при $\cos \varphi = 0,5$?	1 кВ·А	207
	25 кВ·А	211
	10 кВ·А	223
Как изменяется коэффициент мощности асинхронного двигателя при уменьшении его нагрузки?	Не изменяется	182
	Увеличивается	180
	Уменьшается	175

9.12. Однофазный асинхронный двигатель

На статоре однофазного двигателя размещается одна обмотка, которая питается синусоидальным током и создает пульсирующей магнитный поток.

На рис. 9.19 показано, что пульсирующий магнитный поток может быть разложен на два вращающихся в противоположные стороны потока Φ_1 и Φ_2 . Скорости вращения этих потоков равны угловой частоте тока, а амплитуды — половине амплитуды пульсирующего потока Φ .

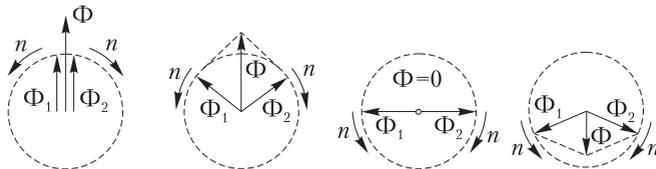


Рис. 9.19

При неподвижном роторе возникают два равных по величине и противоположно направленных вращающих момента $M_{пр}$ и $M_{обр}$, вследствие чего результирующий вра-

щающий момент остается равным нулю. Таким образом, собственный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя равен нулю.

Раскрутим принудительно ротор до скорости n_2 . Тогда скольжение ротора будет равно:

относительно прямого поля

$$s_{\text{пр}} = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

относительно обратного поля

$$s_{\text{обр}} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + (1-s)n_1}{n_1} = 2 - s_{\text{пр}}.$$

Частота тока в роторе, создаваемого прямым полем, равна $s_{\text{пр}}f$, а частота тока, создаваемого обратным полем, — $(2 - s_{\text{пр}})f$. Так, если частота тока в сети $f = 50$ Гц, а скольже-

ние $s_{\text{пр}} = 0,02$, то

$$f_{\text{пр}} = s_{\text{пр}}f = 50 \cdot 0,02 = 1 \text{ Гц};$$

$$f_{\text{обр}} = (2 - s_{\text{пр}})f = 1,98 \cdot 50 = 99 \text{ Гц}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте тока и для прямого тока будет на два порядка меньше, чем для обратного тока. Вследствие этого прямой ток и прямой вращающий момент $M_{\text{пр}}$ будут существенно больше обратного тока и обратного вращающего момента. Следовательно, раскрутив двигатель в любую сторону, можно нагрузить его и двигатель будет продолжать вращаться в ту же сторону. Вращающий момент раскрученного однофазного двигателя незначительно отличается от вращающего момента аналогичного трехфазного двигателя.

Для создания пускового момента на статоре однофазного двигателя размещают дополнительную пусковую обмотку, рассчитанную на кратковременную работу. Эту обмотку включают через конденсатор, вследствие чего ток в ней сдвинут по фазе относительно тока основной обмотки. Образующееся двухфазное вращающееся магнитное поле

раскручивает ротор. По окончании пуска питание пусковой обмотки должно быть отключено. Схема пуска однофазного асинхронного двигателя показана на рис. 9.20.

Однофазные асинхронные двигатели получили наибольшее распространение в бытовых приборах. Их мощность обычно не превышает 500 Вт.

Иногда в качестве однофазного используют трехфазный асинхронный двигатель, у которого в цепь одной из обмоток статора включен конденсатор (рис. 9.21).

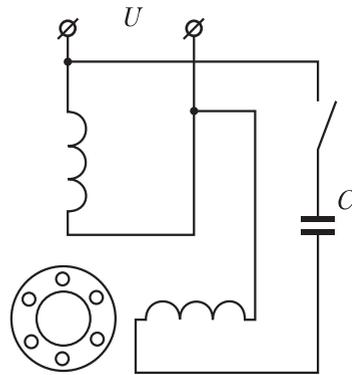


Рис. 9.20

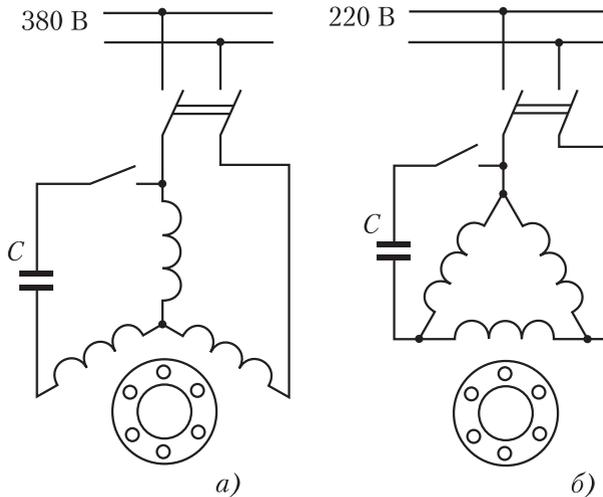


Рис. 9.21

При соединении обмоток звездой (а) величину пусковой емкости подсчитывают по формуле

$$C = \frac{P \cdot 10^9}{314U^2} [\text{мкФ}],$$

где P — мощность двигателя, кВт; U — напряжение сети, В.

При соединении обмоток треугольником (б) пусковая емкость в 3 раза больше, чем в предыдущем случае.

При работе в однофазном режиме трехфазный двигатель без перегрева развивает 60–70% номинальной мощности. Недостаток этих схем — необходимость в дорогостоящих конденсаторах большой емкости: примерно 10 мкФ на каждые 100 Вт мощности двигателя при соединении его обмоток треугольником.

Карточка № 9.14 (368)
Однофазный асинхронный двигатель

В магнитном поле, пульсирующем с частотой 50 Гц, вращается ротор асинхронного двигателя со скоростью 2850 об/мин. Определите скольжение: а) относительно прямого поля; б) относительно обратного поля.	а) 5%; б) 195%	168
	а) 15%; б) 195%	103
	а) 5%; б) 5%	219
Во сколько раз индуктивное сопротивление обмотки ротора для обратного тока больше, чем для прямого тока (в условиях предыдущего примера)?	В 20 раз	217
	В 24 раза	186
	В 39 раз	152
Трехфазный двигатель мощностью 1 кВт включен в однофазную цепь. Какую полезную мощность на валу можно получить от этого двигателя?	Не более 200 Вт	106
	Не более 700 Вт	96
	Не менее 1 кВт	22
Чему равен пусковой момент однофазного асинхронного двигателя, не имеющего пусковой обмотки?	Половине максимального момента	5
	Нулю	80
В каком случае требуется большая пусковая емкость для трехфазного двигателя, подключаемого к однофазной сети?	При соединении обмоток звездой	181
	При соединении обмоток треугольником	172

9.13. Синхронный генератор

Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем (отсюда их название). Поскольку скорости вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока.

Устройство статора синхронной машины (рис. 9.22) практически не отличается от устройства статора асинхронной машины. В пазы статора укладывают трехфазную обмотку, концы которой выводят на клеммовую панель. Ротор в некоторых случаях изготавливают в виде постоянного магнита.

Роторы синхронных генераторов могут быть явнополюсными (рис. 9.23) и неявнополюсными (рис. 9.24). Явнополюсные синхронные генераторы приводятся в действие сравнительно тихоходными турбинами гидроэлектростанций, неявнополюсные — паровыми или газовыми турбинами теплоэлектростанций.

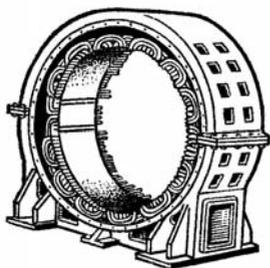


Рис. 9.22

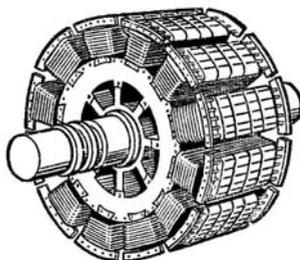


Рис. 9.23

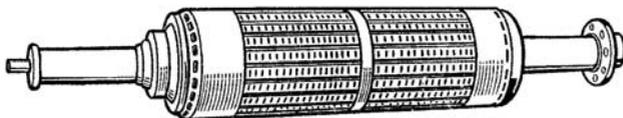


Рис. 9.24

Питание к обмотке ротора подводится через скользящие контакты, состоящие из медных колец и графитовых щеток. При вращении ротора его магнитное поле пересекает витки обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. Чтобы получить

синусоидальную форму ЭДС, зазор между поверхностью ротора и статором делают переменной величины (рис. 9. 25), так чтобы магнитная индукция распределялась по синусоидальному закону.

Частота индуцированной ЭДС (напряжения, тока) синхронного генератора

$$f = (pn)/60,$$

где p — число пар полюсов ротора генератора; n — скорость вращения ротора, об/мин.

Эта формула очевидна: отношение $n/60$ выражает число оборотов ротора в секунду; при $p = 1$ каждый оборот ротора соответствует полному циклу изменений индуцированного переменного тока (одному периоду); при увеличении p соответственно увеличивается и число периодов тока, индуцируемого за один оборот ротора.

Как и у любого генератора, основанного на законе электромагнитной индукции, индуцированная ЭДС пропорциональна магнитному потоку машины и скорости вращения ротора.

Используются различные способы возбуждения синхронных генераторов. Широкое распространение получил синхронный генератор с машинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора можно регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекают сравнительно небольшие токи.

Находят также применение генераторы с самовозбуждением через полупроводниковые или механические выпрямители.

Из характеристик синхронного генератора наибольший практический интерес представляют внешние характеристики, выражающие зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных значениях тока возбуждения, частоты и коэффициента мощности.

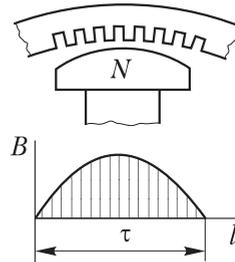


Рис. 9.25

Внешние характеристики снимают при повышении (рис. 9.26, а) и понижении (рис. 9.26, б) напряжения, различных значениях коэффициента мощности нагрузки: $\cos \varphi = 1$, $\cos \varphi = 0,8$ (нагрузка индуктивная), $\cos \varphi = 0,8$ (нагрузка емкостная). Очевидно, что, так же как и у трансформатора, напряжение на зажимах синхронного генератора повышается при увеличении емкостной нагрузки.

Отечественная промышленность выпускает синхронные генераторы на напряжения от 230 до 21 000 В.

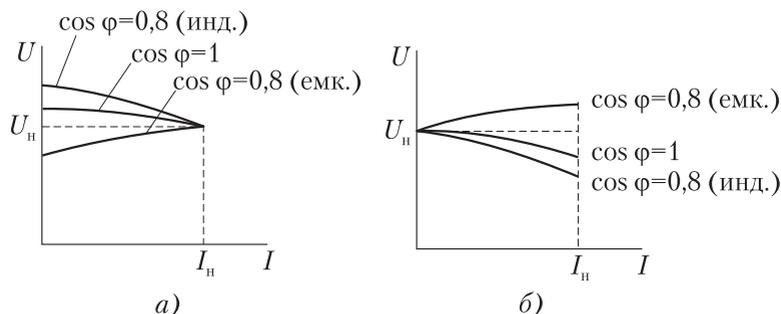


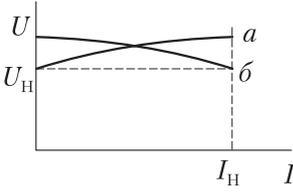
Рис. 9.26

Карточка № 9.15 (149)

Синхронный генератор

Можно ли трехфазную обмотку синхронного генератора большой мощности расположить на роторе?	Можно	109
	Нельзя	88
	Можно, но нецелесообразно	16
Двухполюсный ротор синхронного генератора вращается со скоростью 3000 об/мин. Определите частоту тока.	50 Гц	27
	500 Гц	71
Каким должен быть зазор между ротором и статором синхронного генератора для обеспечения синусоидальной формы индуцируемой ЭДС ?	Меньшим у середины полюсного наконечника, большим по краям	133
	Большим у середины полюсного наконечника, меньшим по краям	166
	Строго одинаковым по всей окружности ротора	202

Продолжение карт. № 9.15

При выполнении каких условий зависимость $U = f(I)$ будет внешней характеристикой синхронного генератора?	$\omega = \text{const}$	206
	$\cos \varphi = \text{const}$	212
	$I_{\text{в}} = \text{const}$	221
	Всех перечисленных условий	154
Каким образом снимались эти внешние характеристики синхронного генератора? 	а) При понижении напряжения; б) то же	113
	а) При повышении напряжения; б) при понижении напряжения	85
	а) При понижении напряжения; б) при повышении напряжения	19
	а) При повышении напряжения; б) то же	64

9.14. Синхронный двигатель

Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит, схематическое изображение на рис. 9.27.

Принцип работы синхронного двигателя поясняется рис. 9.28. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS . Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS . В стационарном режиме скорости вращения обоих магнитов будут одинаковы.

К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше будет угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1 . При некоторой нагрузке силы притяжения между магнитами будут преодолены и ротор остановится

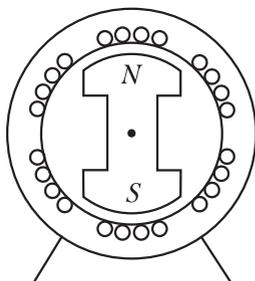


Рис. 9.27

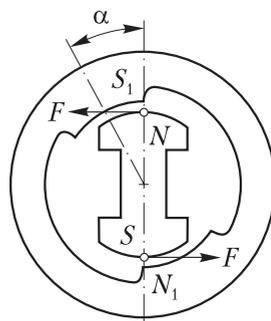


Рис. 9.28

В реальном двигателе поле магнита N_1S_1 заменено вращающимся магнитным полем статора; при этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем статора, отставая на угол α , либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной скоростью, равной скорости вращения магнитного поля статора:

$$n_2 = n_1 = (60f) / p .$$

Постоянство скорости вращения — важное достоинство синхронного двигателя. Строгое постоянство скорости требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука. Недостаток синхронного двигателя — трудность пуска: для пуска надо раскрутить ротор в сторону вращения поля статора. Для этого чаще всего применяют специальную короткозамкнутую обмотку, сделанную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда скорость вращения ротора приближается к скорости вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обесточенной, так как скорость вращения ротора равна скорости поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

В настоящее время существует тенденция замены на подвижных объектах (корабли, самолеты, автомобили) электрических цепей постоянного тока цепями переменного тока повышенной частоты (200, 400 Гц и выше). Возмож-

ность использования бесколлекторных машин переменного тока, трансформаторов и магнитных усилителей позволяет повысить надежность работы цепи, а также уменьшить габариты и массу машин и аппаратов.

При оборудовании объекта сетью переменного тока широкое применение находит электропривод на переменном токе. Разработаны схемы с асинхронными и синхронными двигателями, которые позволяют выполнять все операции, осуществляемые ранее двигателями постоянного тока.

Преимущества асинхронных двигателей особенно заметны тогда, когда по условиям работы привода нет необходимости в плавном регулировании скорости вращения в широких пределах и больших пусковых моментах (привод насосов, вентиляторов и др.).

Синхронные двигатели особенно удобны для привода роторов гироскопов. В тех случаях, когда гироскоп используется для особо точных измерений (например, в баллистических ракетах), приводом ротора гироскопа служит синхронный двигатель. При этом скорость вращения ротора зависит только от конструкции двигателя и частоты питающего тока, которую можно стабилизировать с очень высокой степенью точности.

Карточка № 9.16 (242)

Синхронный двигатель

Чем отличается синхронный двигатель от асинхронного?	Устройством статора	13
	Устройством ротора	66
Нужны ли щетки и контактные кольца для синхронного двигателя, ротор которого представляет собой постоянный магнит?	Нужны	163
	Не нужны	39
Нужны ли щетки и контактные кольца для синхронного двигателя, ротор которого изготовлен в виде электромагнита?	Нужны	118
	Не нужны	164

Продолжение карт. № 9.16

$f = 500$ Гц; $p = 1$. Определите скорость вращения ротора синхронного двигателя.	2850 об/мин	156
	30 000 об/мин	125
	15 000 об/мин	43
С какой целью на роторе синхронного двигателя иногда размещают короткозамкнутую обмотку?	Для увеличения вращающего момента	75
	Для раскручивания ротора при пуске	94

ГЛАВА 10

ТРАНСФОРМАТОРЫ

10.1. Назначение трансформаторов и их применение

Трансформатор предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Увеличение напряжения осуществляется с помощью повышающих трансформаторов, уменьшение — понижающих.

Трансформатор — простой, надежный и экономичный электрический аппарат. Он не имеет движущихся частей и скользящих контактных соединений, его КПД достигает 99%.

Трансформаторы применяются в линиях электропередачи, в технике связи, в автоматике, измерительной технике и других областях.

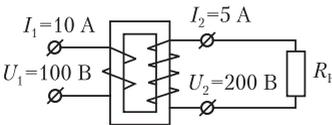
В соответствии с назначением различают: силовые трансформаторы для питания электрических двигателей и осветительных сетей; специальные трансформаторы для питания сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей особого назначения; измерительные трансформаторы для подключения измерительных приборов.

По числу фаз трансформаторы делятся на однофазные и трехфазные. Трансформаторы, используемые в технике связи, делятся на низкочастотные и высокочастотные.

Расчетные мощности трансформаторов весьма различны — от долей вольт-ампера до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты — от единиц герц до сотен килогерц.

Карточка № 10.1 (269)

Назначение трансформаторов и их применение

Укажите одно из важнейших достоинств цепей переменного тока по сравнению с цепями постоянного тока.	Возможность передачи электроэнергии на дальние расстояния	130
	Возможность преобразования электроэнергии в тепловую и механическую	26
	Возможность изменения величины напряжения и тока в цепи с помощью трансформатора	168
При каком напряжении целесообразно а) передавать электроэнергию; б) потреблять электроэнергию	а) Высоком; б) низком	63
	а) Низком; б) высоком	85
	Это зависит от характера тока	160
	а) Высоком; б) высоком	69
Какой трансформатор изображен на схеме? 	Понижающий, так как ток во вторичной цепи меньше тока в первичной цепи	99
	Повышающий, так как напряжение во вторичной цепи больше напряжения в первичной цепи	53
Где применяются трансформаторы?	В линиях электропередачи	64
	В технике связи	164
	В автоматике и измерительной технике	55
	Во всех перечисленных и многих других областях техники	43
Какие трансформаторы используются для питания электроэнергией жилых помещений?	Силовые	142
	Измерительные	159
	Специальные	102

10.2. Устройство трансформатора

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод (рис. 10.1), на котором расположены две или несколько обмоток. В маломощных высокочастотных трансформаторах, используемых в радиотехнических схемах, магнитопроводом может являться воздушная среда.

Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод изготавливают из магнитомягкого материала — трансформаторной стали, имеющей узкую петлю намагничивания. Для уменьшения потерь на вихревые токи в материал магнитопровода вводят примесь кремния, повышающую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм, изолированных друг от друга теплостойким лаком или специальной бумагой.

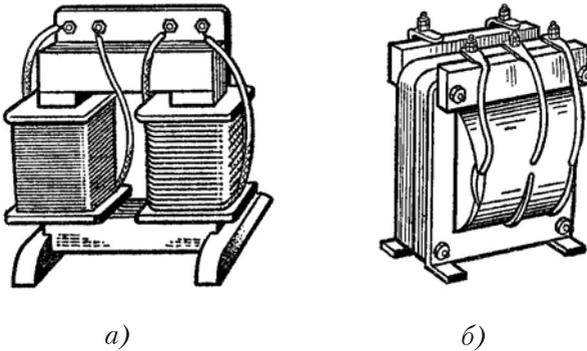


Рис. 10.1

Различают трансформаторы стержневого (рис.10.1, *a*) и броневого (рис. 10.1, *б*) типов. Последний хорошо защищает катушки (обмотки) от механических повреждений. Верхнюю часть магнитопровода, называемую ярмом, крепят после насадки на стержень катушек (обмоток). Стержни и ярмо соединяют очень плотно, чтобы исключить воздушные зазоры на стыках. В маломощных трансформаторах находят широкое применение кольцевые магнитопроводы, которые собирают из штампованных колец или навивают из длинной ленты. В этих магнитопроводах отсутствует воздушный зазор, поэтому магнитный поток рассеяния мал. В транс-

форматорах, рассчитанных на повышенные частоты, кольцевые магнитопроводы часто прессуют из ферромагнитного порошка, смешанного с изоляционным лаком.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одну под другой. В последнем случае непосредственно к стержню примыкает обмотка низшего напряжения, а поверх нее размещается обмотка высшего напряжения.

Обмотка трансформатора, к которой подводится напряжение питающей сети, называется первичной, а обмотка, к которой подсоединяется нагрузка, — вторичной. На сердечнике может быть размещено несколько вторичных обмоток с разным числом витков, что позволяет получить различные по величине вторичные напряжения.

При работе трансформатора за счет токов в обмотках, а также вследствие перемагничивания магнитопровода и вихревых токов выделяется тепло. Трансформаторам небольшой мощности (до 10 кВ·А) достаточно воздушного охлаждения; они называются сухими.

В мощных трансформаторах применяется масляное охлаждение. Устройство трансформатора показано на рис. 10.2, где 1 — магнитопровод; 2 — обмотка низшего напряжения; 3 — обмотка высшего напряжения; 4 — бак; 5 — пробки для заливки и слива масла; 6 — расширитель. Магнитопровод с обмотками размещается в баке, заполненном минеральным (трансформаторным) маслом. Масло не только отводит тепло за счет конвекции или принудительной циркуляции, но и является хорошим диэлектриком (изолятором).

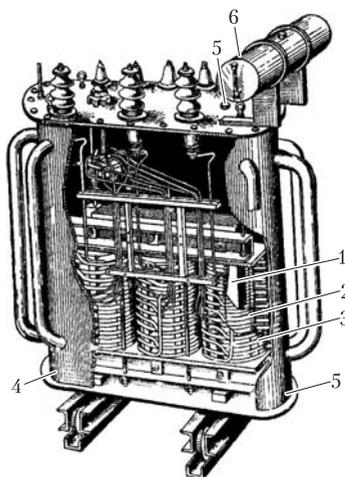


Рис. 10.2

Масляные трансформаторы надежны в работе и имеют меньшие размеры и массу по сравнению с «сухими» трансформаторами той же мощности. При изменении температуры объем масла меняется. При повышении

температуры излишек масла поглощается расширителем, а при понижении температуры масло из расширителя возвращается в основной бак.

В тех случаях, когда требуется плавно изменять вторичное напряжение, применяют скользящий контакт для изменения числа витков обмотки (примерно так же, как это делается в ползунковых реостатах). Скользящий контакт широко используется в автотрансформаторах, рассчитанных на регулирование напряжения в небольших пределах (рис. 10.3). Цифрами на рисунке указаны: 1 — ручка скользящего контакта; 2 — скользящий контакт; 3 — обмотка.

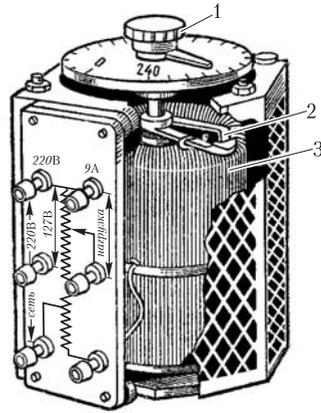
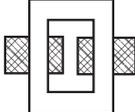
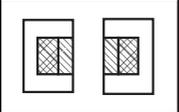
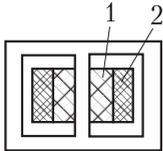


Рис. 10.3

Карточка № 10.2 (167)
Устройство трансформатора

Какие трансформаторы изображены на рисунках?  	а) Стержневого типа; б) то же	103
	а) Стержневого типа; б) броневое типа	25
	а) Броневое типа; б) стержневого типа	171
Почему магнитопроводы высокочастотных трансформаторов прессуют из ферромагнитного порошка?	Для упрощения технологии изготовления	56
	Для увеличения магнитной проводимости	75
	Для уменьшения тепловых потерь	111

Продолжение карт. № 10.2

Какая из обмоток является обмоткой низшего напряжения? 	Обмотка 1	7
	Обмотка 2	178
Почему допустимая плотность тока в обмотках трансформаторов с масляным охлаждением, составляющая 2–4 А/мм ² примерно в 2 раза выше, чем в «сухих» трансформаторах?	Потому, что надежнее изоляция витков	1
	Потому, что лучше условия охлаждения	47
Можно ли расширитель трансформатора полностью залить маслом?	Можно	120
	Нельзя	177

10.3. Формула трансформаторной ЭДС

Рассмотрим катушку (рис. 10.4) к зажимам которой подведено синусоидальное напряжение. Пренебрежем активным сопротивлением катушки и потерями на гистерезис и вихревые токи. Тогда приложенное к катушке напряжение $u = U_m \sin \omega t$ будет уравновешиваться только ЭДС самоиндукции

$$e = E_m \sin \omega t.$$

Это очевидно, так как полностью уравновешивать друг друга могут только равные по величине и одинаково изменяющиеся во времени величины.

В соответствии с законом электромагнитной индукции

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt},$$

следовательно,

$$E_m \sin \omega t = -\omega \frac{d\Phi}{dt}.$$

Это дифференциальное уравнение позволяет найти зависимость между ЭДС обмотки и магнитным потоком в магнитопроводе (сердечнике):

$$d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \sin \omega t dt.$$

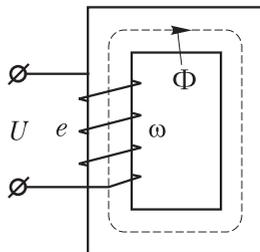


Рис. 10.4

Проинтегрируем левую и правую части:

$$\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \int \sin \omega t dt = \frac{E_m}{\omega \omega} \cos \omega t + A.$$

Здесь постоянная интегрирования A равна нулю, так как синусоидальная ЭДС не может создать постоянную составляющую магнитного потока. Таким образом,

$$\Phi = \frac{E_m}{\omega \omega} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t,$$

где $\Phi_m = E_m / (\omega \omega)$ — амплитуда переменного магнитного потока в сердечнике катушки.

Подставив в последнее равенство $E_m = \sqrt{2}E$ и $\omega = 2\pi f$,

получим

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E}{2\pi f \omega},$$

или

$$E = \frac{2\pi f \omega \Phi_m}{\sqrt{2}}$$

Нетрудно подсчитать, что $2\pi/\sqrt{2} = 4,44$, т.е.

$$E = 4,44 f \omega \Phi_m.$$

Это выражение, связывающее действующее значение ЭДС в обмотке с амплитудой магнитного потока в сердечнике, принято называть *формулой трансформаторной ЭДС*. Она играет важную роль в теории трансформаторов и электрических машин переменного тока.

Карточка № 10.3 (307)

Формула трансформаторной ЭДС

Будет ли протекать ток через обмотку катушки, если потери в магнитопроводе (сердечнике) равны нулю?	Будет	174
	Не будет	143
Какое уравнение связывает магнитный поток в сердечнике с мгновенным значением ЭДС в обмотке?	$e = E_m \sin \omega t.$	39
	$d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \sin \omega t.$	163
	Другое уравнение	134
Найдите интеграл $\int \sin \omega t dt.$	$\frac{1}{\omega} \cos \omega t$	50
	$-\frac{1}{\omega} \cos \omega t$	22
	$-\frac{1}{\omega} \cos \omega t + A$	33
$\Phi = 0,01 \cos t.$ Определите амплитуду магнитного потока $\Phi_m.$	0,01 Вб	79
	Для решения задачи недостаточно данных	30
	0,01/ В·с	176
$f = 100/2\pi \text{ с}^{-1}.$ $\omega = 100\sqrt{2}; \Phi_m = 0,01 \text{ В} \cdot \text{с}.$ Определить ЭДС $E.$	4,44 В	100
	44,4 В	140
	100 В	58

10.4. Принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции, которое является следствием закона электромагнитной индукции.

Рассмотрим более подробно сущность процесса трансформации тока и напряжения. Принципиальная схема однофазного трансформатора рис. 10.5.

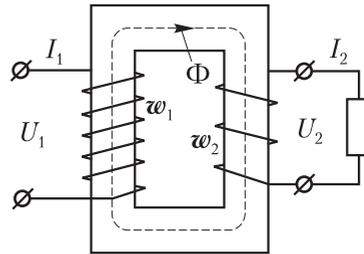


Рис. 10.5

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением U_1 по обмотке начнет проходить ток I_1 , который создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.

Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , выражения индуцируемых в обмотке ЭДС можно записать в виде

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m,$$

где f — частота переменного тока; w_1, w_2 — числа витков обмоток; Φ_m — амплитудное значение переменного магнитного потока Φ .

Поделив одно равенство на другое, получим

$$E_2 / E_1 = w_2 / w_1 = k.$$

Отношение чисел витков обмоток трансформатора называют коэффициентом трансформации k .

Таким образом, коэффициент трансформации показывает, как относятся действующие значения ЭДС вторичной и первичной обмоток.

На основании закона электромагнитной индукции можно написать

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Поделив одно равенство на другое, получим

$$e_2 / e_1 = \omega_2 / \omega_1 = k.$$

Следовательно, в любой момент времени отношение мгновенных значений ЭДС вторичной и первичной обмоток равно коэффициенту трансформации. Нетрудно понять, что это возможно только при полном совпадении по фазе ЭДС e_1 и e_2 .

Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута (режим холостого хода), то напряжение на зажимах обмотки равно ее ЭДС: $U_2 = E_2$, а напряжение питающей сети почти полностью уравнивается ЭДС первичной обмотки: $U \approx E_1$. Следовательно, можно написать, что

$$k = E_2 / E_1 \approx U_2 / U_1.$$

Таким образом, коэффициент трансформации может быть определен на основании измерений напряжения на входе и выходе ненагруженного трансформатора. Отношение напряжений на обмотках ненагруженного трансформатора указывается в его паспорте.

Учитывая высокий КПД трансформатора, можно полагать, что $S_1 \approx S_2$, где $S_1 = U_1 I_1$ — мощность, потребляемая из сети, а $S_2 = U_2 I_2$ — мощность, отдаваемая в нагрузку.

Таким образом, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, откуда

$$I_1 / I_2 \approx U_2 / U_1 = k.$$

Отношение токов первичной и вторичной обмоток приближенно равно коэффициенту трансформации.

Карточка № 10.4 (249)

Принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации

На чем основан принцип действия трансформатора?	На законе Ампера	154
	На законе электромагнитной индукции	147
	На принципе Ленца	144

Продолжение карт. № 10.4

Чему равно отношение действующих и мгновенных значений ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора?	Отношению чисел витков обмоток	153
	Приблизительно отношению чисел витков обмоток	149
Может ли напряжение на зажимах вторичной обмотки превышать: а) ЭДС E_1 в первичной обмотке; б) ЭДС E_2 во вторичной обмотке?	а) Может; б) не может	185
	а) Не может; б) не может	70
	а) Может; б) не может	141
	а) Не может; б) может	145
Чему равно отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток?	Отношению чисел витков обмоток	151
	Приблизительно отношению чисел витков обмоток	136
$U_1 = 200 \text{ В}; P = 1 \text{ кВт};$ $I_2 = 0,5 \text{ А}.$ Определите приближенное значение коэффициента трансформации.	Для решения задачи недостаточно данных	68
	$k \approx 50$	112
	$k \approx 10$	172
	$k \approx 0,1$	52

10.5. Режим холостого хода трансформатора

Холостым ходом трансформатора называют такой режим его работы, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута, а к первичной обмотке подведено номинальное напряжение (рис. 10.6).

В режиме холостого хода ток во вторичной цепи и мощность, отдаваемая в нагрузку, равны нулю. Трансформатор потребляет из сети ток холостого хода I_0 , который создает

магнитный поток в сердечнике и покрывает потери на гистерезис и вихревые токи. Ток I_0 составляет несколько процентов от номинального тока.

Помимо магнитного потока Φ , замыкающего по магнитопроводу и индуцирующего в обмотках ЭДС E_1 и E_2 , в трансформаторе

возникают магнитные потоки рассеяния Φ_σ , каждый из которых связан только со своей обмоткой и замыкается по воздуху. В режиме холостого хода магнитный поток рассеяния связан с первичной обмоткой, так как вторичная обмотка обесточена. Магнитный поток рассеяния определяет индуктивное сопротивление обмоток трансформатора x_σ так же, как поток самоиндукции определяет индуктивное сопротивление любой обмотки x_L , включенной в цепь переменного тока:

$$x_\sigma = \omega L_\sigma,$$

где L_σ — индуктивность рассеяния обмотки.

Кроме того, напомним, что обмотка трансформатора обладает активным сопротивлением R_1 .

С учетом сказанного уравнение второго закона Кирхгофа в векторной форме для первичной цепи в режиме холостого хода можно записать в виде

$$\overline{U_1} = -\overline{E_1} + \overline{I_0 R_1} + \overline{I_0 x_{1\sigma}}.$$

Соотношения между синусоидально изменяющимися физическими величинами, характеризующими работу трансформатора, могут быть наглядно представлены векторной диаграммой (рис. 10.7).

Построение диаграммы проводим следующим образом. Откладываем вектор магнитного потока $\overline{\Phi}_m$, замыкающегося по магнитопроводу трансформатора, и совпадающий с ним по фазе вектор намагничивающего тока \overline{I}_m .

Если магнитный поток изменяется по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, то ЭДС определяются выражениями

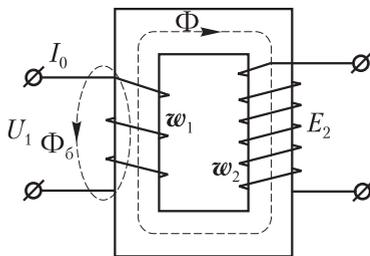


Рис. 10.6

производных от синусоидальной функции времени:

$$e_1 = -E_{1m} \cos \omega t; \quad e_2 = -E_{2m} \cos \omega t.$$

Очевидно, что ЭДС e_1 и e_2 отстают по фазе от магнитного потока на 90° .

Откладываем векторы \bar{E}_1 и \bar{E}_2 , повернув их на 90° по часовой стрелке относительно вектора $\bar{\Phi}_m$. Откладываем вектор $\bar{U}'_1 = -\bar{E}_1$ и совпадающий с ним по фазе вектор тока потерь в стали на гистерезис и вихревые токи \bar{I}_c . Откладываем вектор тока холостого хода $\bar{I}_0 = \sqrt{\bar{I}_c^2 + \bar{I}_\mu^2}$. Прибавляем к вектору $-\bar{E}_1$ вектор $\bar{I}_0 R_1$, совпадающий по фазе с вектором тока \bar{I}_0 , и вектор $\bar{I}_0 x_{1\sigma}$,

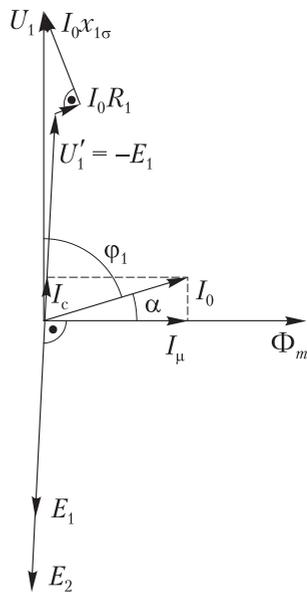


Рис. 10.7

опережающий на 90° вектор тока холостого хода. В соответствии с уравнением второго закона Кирхгофа сумма указанных векторов равна вектору приложенного к первичной обмотке напряжения \bar{U}_1 .

На рис. 10.7 для большей наглядности реальные соотношения между векторами искажены. В действительности вектор тока потерь в стали \bar{I}_c значительно меньше вектора намагничивающего тока \bar{I}_μ , а угол α , на который вектор \bar{I}_0 повернут относительно вектора $\bar{\Phi}_m$, составляет всего $5-6^\circ$. Кроме того, векторы $\bar{I}_0 x_{1\sigma}$ и $\bar{I}_0 R_1$ значительно меньше по величине вектора \bar{E}_1 и составляют $2-3\%$ от него. Особенно мало падение напряжения на активном сопротивлении обмотки. Практически в большинстве случаев им пренебрегают.

Отметим также, что реально в первичной обмотке трансформатора протекает один ток \bar{I}_0 . Токи \bar{I}_c и \bar{I}_μ , физический смысл которых был рассмотрен выше, являются его составляющими.

Карточка № 10.5 (230)

Режим холостого хода трансформатора

Какое равенство несправедливо при холостом ходе трансформатора?	$E_1 \approx U_{1н}$	135
	$E_2 \approx U_2$	165
	$U_2 / U_1 \approx k$	132
	$I_1 / I_2 \approx k$	8
Чем принципиально отличается магнитный поток рассеяния от основного магнитного потока трансформатора?	Магнитный поток рассеяния замыкается по воздуху, основной — по магнитопроводу	28
	Магнитный поток рассеяния в десятки раз меньше основного магнитного потока	86
	Магнитный поток рассеяния сцеплен с одной обмоткой, основной — с двумя	54
Трансформатор включен в сеть переменного тока промышленной частоты. Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{\sigma} = 0,001$ Гн. Определите индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки.	0,314 Ом	183
	0,05 Ом	107
	0,1 Ом	37
Какие синусоидально изменяющиеся физические величины совпадают по фазе при холостом ходе трансформатора?	Φ, E_1, E_2	170
	E_1, E_2, U_2	173
	E_1, U_1, U_2	114
	Φ, I_0	109
При каком условии ток холостого хода совпадает по фазе с магнитным потоком в сердечнике?	Ни при каком	129
	При отсутствии потерь в сердечнике на гистерезис и вихревые токи	12
	При $k = 1$	78

10.6. Опыт холостого хода трансформатора

Схема, по которой проводится опыт холостого хода трансформатора, изображена на рис. 10.8. В опыте измеряются напряжение, ток и мощность первичной обмотки, ЭДС (напряжение холостого хода) вторичной обмотки. На основании этих измерений определяют потери в сердечнике, коэффициент трансформации, составляющие тока холостого хода и строят векторную диаграмму. Опыт холостого хода проводят при номинальном напряжении U_1 , а следовательно, при расчетном значении магнитного потока в сердечнике.

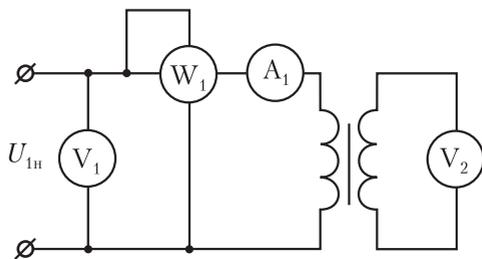


Рис. 10.8

При холостом ходе трансформатора потери энергии в обмотках невелики: во вторичной обмотке они полностью отсутствуют, так как $I_2 = 0$, а в первичной обмотке составляют десятые доли процента (0,002—0,003 от номинальных потерь), так как ток холостого хода в десятки раз меньше номинального тока. Поэтому потерями в обмотках можно пренебречь и считать, что ваттметр показывает потери в сердечнике трансформатора на гистерезис и вихревые токи. Эти потери в режиме холостого хода равны потерям в сердечнике трансформатора при номинальном режиме, так как определяются величиной магнитного потока в сердечнике.

Составляющая тока холостого хода, идущая на покрытие потерь в сердечнике, определяется по известной формуле

$$I_c = P/U_1',$$

где P — показания ваттметра, а U_1' — напряжение, приближенно равное U_1 .

Если известно отношение чисел витков обмотки k , то значение U'_1 может быть определено более точно: $U'_1 = U_2 / k$, где U_2 измеряется вольтметром.

Намагничивающий ток при холостом ходе определяют как катет прямоугольного треугольника:

$$I_{\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_c^2}.$$

Если число витков обмоток неизвестно, то коэффициент трансформации оценивают по показаниям вольтметров:

$$k \approx U_2 / U_1.$$

Карточка № 10.6 (161)

Опыт холостого хода трансформатора

Какие приборы необходимы для опыта холостого хода трансформатора?	Два вольтметра, ваттметр, два амперметра	123
	Два вольтметра, ваттметр, амперметр	9
	Два вольтметра, амперметр	89
При холостом ходе трансформатора каковы потери: а) в сердечнике; б) в обмотках?	а) Равны номинальным; б) пренебрежимо малы	125
	а) Пренебрежимо малы; б) то же	51
	а) Равны номинальным; б) то же	31
	а) Пренебрежимо малы; б) равны номинальным	101
Какую мощность измеряет ваттметр при холостом ходе трансформатора?	Мощность потерь в трансформаторе при номинальном режиме	108
	Мощность потерь в сердечнике при номинальном режиме	92
	Мощность потерь в обмотках при номинальном режиме	17
	Мощность потерь в обмотках при холостом ходе	131

Продолжение карт. № 10.6

В опыте холостого хода трансформатора приборы показывают: $U_1 = 100$ В; $U_2 = 500$ В; $I_0 = 5$ А; $P = 100$ Вт. Определите намагничивающий ток.	1 А	45
	4,9 А	3
	5 А	20
	5,1 А	71
В предыдущем случае число витков первичной обмотки $w_1 = 200$. Определите число витков вторичной обмотки.	100	59
	500	42
	1000	32

10.7. Работа трансформатора под нагрузкой

При подключении к трансформатору нагрузки в цепи вторичной обмотки проходит ток, создающий в сердечнике свой магнитный поток, который по принципу Ленца направлен против магнитного потока первичной обмотки. При этом замыкающийся по сердечнику магнитный поток $\bar{\Phi}_m$ равен геометрической сумме магнитных потоков:

$$\bar{\Phi}_m = \bar{\Phi}_{1m} + \bar{\Phi}_{2m},$$

где $\bar{\Phi}_{1m}$ и $\bar{\Phi}_{2m}$ создаются токами первичной и вторичной обмоток.

Приняв во внимание, что $\bar{U}_1 \approx -\bar{E}_1$ и учтя формулу трансформаторной ЭДС, получим

$$U_1 \approx 4,44 f w_1 \Phi_m.$$

Напряжение сети U_1 к которой подключен трансформатор, практически не зависит от нагрузки, следовательно, (это ясно из последней формулы) и магнитный поток в сердечнике не зависит от тока нагрузки: $\Phi_m = \text{const}$. Физически это можно представить следующим образом. С увеличением тока нагрузки пропорционально увеличивается ток, потребляемый трансформатором из сети. Магнитные потоки первичной и вторичной обмоток одновременно увеличи-

ваются, а так как они направлены встречно, результирующий магнитный поток Φ_m остается неизменным.

Поскольку $\Phi_m = \text{const}$, намагничивающая сила, создающая магнитный поток, неизменна:

$$\overline{F} = \overline{I_1 \omega_1} + \overline{I_2 \omega_2} = \text{const}.$$

Здесь $I_1 \omega_1$ и $I_2 \omega_2$ — намагничивающая сила соответственно первичной и вторичной обмоток.

При холостом ходе $I_2 = 0$, $I_1 = I_0$, следовательно,

$$F = I_0 \omega_1.$$

Поскольку величина F не изменяется при всех режимах работы трансформатора, можно написать

$$\overline{I_0 \omega_1} = \overline{I_1 \omega_1} + \overline{I_2 \omega_2}.$$

Это уравнение называют *уравнением намагничивающих (магнитодвижущих) сил трансформатора*.

Векторная диаграмма нагруженного трансформатора без учета сопротивления обмоток изображена на рис. 10.9.

Построение диаграммы начинаем с вектора магнитного потока $\overline{\Phi}_m$. Векторы ЭДС \overline{E}_1 и \overline{E}_2 отстают по фазе от вектора потока $\overline{\Phi}_m$ на 90° . Поскольку сопротивление обмоток не учитывается, принимаем $\overline{U}_2 \approx \overline{E}_2$, $\overline{U}_1 = -\overline{E}_1$.

Угол φ_2 сдвига фаз между вектором тока \overline{I}_2 и вектором напряжения на нагрузке \overline{U}_2 определяем по его тангенсу:

$$\text{tg } \varphi_2 = x_n / R_n,$$

где x_n и R_n — соответственно реактивное и активное сопротивления потребителя электрической энергии.

Так как реактивное сопротивление нагрузки может иметь как индуктивный, так и емкостный характер, вектор тока \overline{I}_2 может отставать или опережать по фазе вектор напряжения \overline{U}_2 .

Положение вектора тока \overline{I}_0 определяют на основании опыта холостого хода трансформатора. После того как построены векторы $\overline{I_2 \omega_2}$ и $\overline{I_0 \omega_1}$ (параллельные векторам \overline{I}_2 и

\bar{I}_0), положение вектора $\overline{I_1 \omega_1}$ определяют из уравнения намагничивающих сил трансформатора.

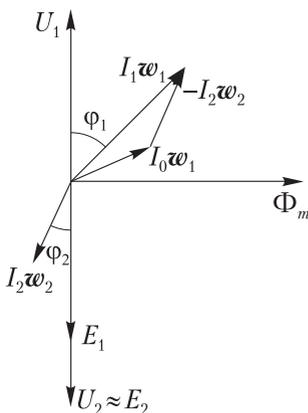


Рис. 10.9

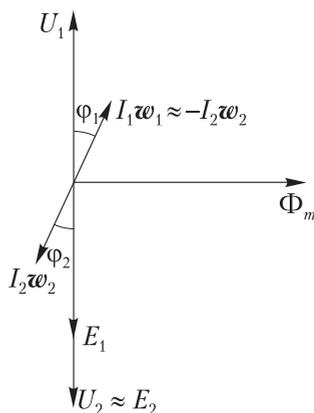


Рис. 10.10

Из векторной диаграммы очевидно, что угол φ_1 сдвига фаз между вектором напряжения сети \bar{U}_1 и вектором тока \bar{I}_1 , потребляемого из сети, зависит от угла φ_2 , т.е. от характера нагрузки. Остановимся более подробно на этом, введя дополнительные упрощения. Пренебрежем током \bar{I}_0 , который составляет около 5% от тока \bar{I}_1 и построим векторную диаграмму (рис. 10.10). При этом получаем $\overline{I_1 \omega_1} \approx -\overline{I_2 \omega_2}$, а $\varphi_1 \approx \varphi_2$. Таким образом, включение нагрузки в сеть через трансформатор практически не изменяет коэффициента мощности $\cos \varphi$. Равенство углов φ_1 и φ_2 приближенное. Оно нарушается тем больше, чем больше падение напряжения в обмотках трансформатора и ток холостого хода.

Карточка № 10.7 (304)

Работа трансформатора под нагрузкой

Как изменится магнитный поток в сердечнике трансформатора при увеличении тока нагрузки в 2 раза?	Не изменится	4
	Увеличится в 2 раза	35
	Уменьшится в 2 раза	118

Продолжение карт. № 10.7

Ток холостого хода равен 1 А, первичная обмотка имеет 100 витков. Чему равна результирующая намагничивающая сила первичной и вторичной обмоток при номинальной нагрузке трансформатора?	Для решения задачи необходимо знать ток нагрузки	21
	Для решения задачи необходимо знать ток нагрузки и число витков вторичной обмотки	138
	100 А	90
При номинальной нагрузке магнитный поток в сердечнике трансформатора равен Φ_m , результирующая намагничивающая сила обмоток F . Чему равны эти величины при холостом ходе трансформатора?	$\Phi_m; F$	41
	0; F	106
	$\Phi_m; 0$	38
	Обе величины близки к нулю	186
Какие переменные физические величины совпадают по фазе при работе нагруженного трансформатора?	$E_1; E_2; U_2$	124
	$E_1; E_2$	87
	$E_2; U_2$	15
	$-E_1; U_1$	5
Угол сдвига фаз между напряжением на вторичной обмотке и током нагрузки увеличился в 2 раза. Как изменился угол сдвига фаз между напряжением и током в первичной обмотке?	Не изменился	158
	Увеличился примерно в 2 раза	182
	Уменьшился примерно в 2 раза	121

10.8. Внешняя характеристика трансформатора. Процентное изменение вторичного напряжения

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока нагрузки при неизменных частоте, напряжении на пер-

вичной обмотке и коэффициенте мощности: $U_2 = f(I_2)$ при $\omega = \text{const}$, $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$.

При чисто активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$) напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора с увеличением тока нагрузки уменьшается. Это объясняется увеличением внутреннего падения напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Влияние характера нагрузки на величину вторичного напряжения поясняется рис. 10.11, на котором построены векторные диаграммы для вторичной цепи трансформатора в соответствии с уравнением второго закона Кирхгофа в векторной форме:

$$\overline{U_2} = \overline{E_2} + \overline{I_2 R_2} + \overline{I_2 x_{2\sigma}}$$

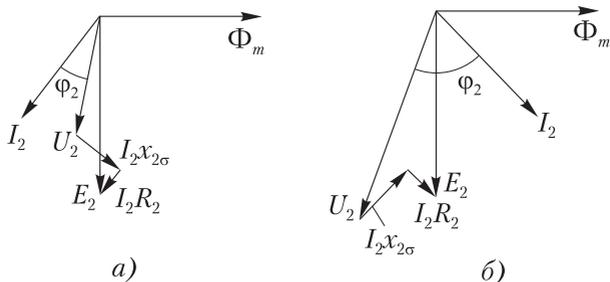


Рис. 10.11

Чтобы получить вектор $\overline{E_2}$, надо к вектору $\overline{U_2}$ прибавить векторы $\overline{I_2 R_2}$ и $\overline{I_2 x_{2\sigma}}$. При этом следует иметь в виду, что вектор $\overline{I_2 R_2}$ совпадает по фазе с вектором $\overline{I_2}$, а вектор $\overline{I_2 x_{2\sigma}}$ опережает по фазе вектор $\overline{I_2}$ на 90° . Нетрудно заметить, что при прочих равных условиях при индуктивном характере нагрузки (рис. 10.11, а) с увеличением угла φ_2 напряжение U_2 несколько понижается, а при емкостном характере нагрузки (рис. 10.11, б) — повышается.

Таким образом, индуктивная нагрузка приводит к более резкому снижению напряжения U_2 по сравнению с чисто активной нагрузкой, а емкостная нагрузка препятствует его уменьшению и может даже привести к незначительному повышению напряжения на зажимах вторичной обмотки при увеличении нагрузки.

Внешние характеристики трансформатора представлены на рис. 10.12.

В качестве одной из практических характеристик трансформатора принимают изменение его вторичного напряжения ΔU_2 , которое измеряют при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения, при неизменных частоте, напряжении питания и коэффициенте мощности трансформатора.

Изменение напряжения ΔU определяют на основании опыта или расчета с использованием векторной диаграммы.

Опытное определение напряжения ΔU возможно двумя способами (рис. 10.13):

1) устанавливают номинальное значение $U_{2н}$ вторичного напряжения при холостом ходе трансформатора, а затем нагружают трансформатор и измеряют напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки при номинальном токе нагрузки;

2) устанавливают номинальное значение $U_{2н}$ вторичного напряжения при номинальной нагрузке трансформатора, а затем уменьшают нагрузку до нуля и измеряют напряжение U_2 при холостом ходе.

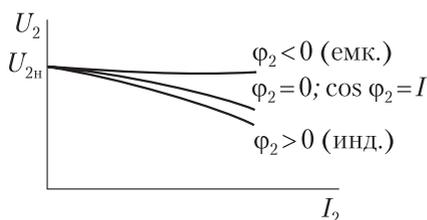


Рис. 10.12

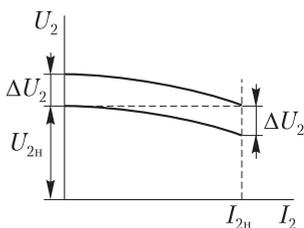


Рис. 10.13

Изменение напряжения принято выражать в процентах от номинального значения вторичного напряжения:

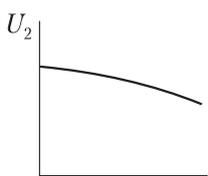
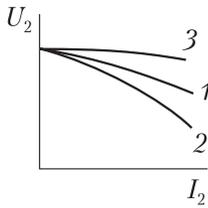
$$\Delta U_2, \% = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100.$$

У выпускаемых отечественной промышленностью силовых трансформаторов изменение вторичного напряжения при $\cos \varphi_2 = 0,8$ колеблется в пределах от 4 до 8%.

Карточка № 10.8 (131)

Внешняя характеристика трансформатора.

Процентное изменение вторичного напряжения

Какие из величин, которые могут изменяться в процессе работы трансформатора, влияют на напряжение вторичной обмотки U_2 ?	$U_1, \omega, x_{1\sigma}, I_2$	23
	$U_1, \omega, I_2, \varphi_2$	77
	$I_2, \omega, x_{2\sigma}, R_H$	24
 <p>На рисунке изображена внешняя характеристика трансформатора. Какая величина откладывается по оси абсцисс?</p>	U_1	74
	$\cos \varphi_2$	82
	R_H	76
	I_2	19
 <p>Кривая 1 соответствует чисто активной нагрузке трансформатора. При каком характере нагрузки получены кривые 2 и 3?</p>	Индуктивном (2); индуктивном (3)	44
	Индуктивном (2); емкостном (3)	115
	Емкостном (2); индуктивном (3)	57
При холостом ходе трансформатора номинальное напряжение $U_{2H} = 400$ В. При номинальной нагрузке $U_2 = 380$ В. Определите изменение вторичного напряжения трансформатора.	5%	10
	5,1%	137
	Для решения задачи недостаточно данных	117

Продолжение карт. № 10.8

Какой характер имела нагрузка трансформатора в предыдущем случае?	Емкостный	146
	Индуктивный	122
	Активный	96
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	110

10.9. Потери энергии и коэффициент полезного действия трансформатора

При рассмотрении опыта холостого хода было установлено, что потери в сердечнике трансформатора могут быть измерены ваттметром, включенным в первичную цепь. Эти потери зависят от величины магнитного потока и при изменении нагрузки трансформатора от нуля до номинального значения практически не изменяются.

Помимо потерь в сердечнике возникают тепловые потери в обмотках трансформатора, которые пропорциональны квадрату силы тока и существенно изменяются при изменении нагрузки.

Для определения потерь в обмотках при номинальном токе нагрузки ставится опыт короткого замыкания трансформатора.

Режим короткого замыкания трансформатора при номинальном напряжении первичной обмотки является аварийным: обмотки быстро перегреваются и трансформатор выходит из строя. Поэтому опыт короткого замыкания проводится при пониженном напряжении U_1 . Принципиальная схема опыта короткого замыкания трансформатора показана на рис. 10.14.

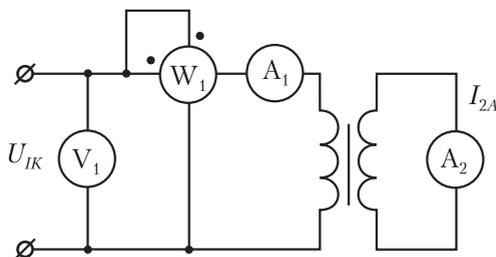


Рис. 10.14

В опыте короткого замыкания помимо токов и напряжений измеряется мощность, потребляемая трансформатором из сети.

При постановке опыта короткого замыкания подводимое к трансформатору напряжение U_1 постепенно повышается от нуля до значения, при котором токи в первичной и вторичной обмотках достигают номинальных значений. При этом напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ составляет примерно 5% от номинального значения U_1 . Из формулы трансформаторной ЭДС следует, что магнитный поток в сердечнике пропорционален напряжению U_1 . Следовательно, в опыте короткого замыкания магнитный поток составляет около 5% от номинального значения, а потери в сердечнике — тысячные доли номинальных потерь. Поэтому можно считать, что в опыте короткого замыкания ваттметр измеряет потери в обмотках трансформатора.

Измерив потери, можно подсчитать КПД трансформатора по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_m},$$

где P_2 — мощность приемника; P_c — потери в стали сердечника; P_m — потери в меди обмоток.

Поскольку потери в обмотках зависят от нагрузки, КПД трансформатора зависит от режима его работы. Можно показать, что КПД трансформатора достигает максимального значения при таком токе нагрузки, при котором потери в обмотках становятся равными потерям в сердечнике.

Зависимость КПД трансформатора от тока нагрузки изображена на рис. 10.15.

Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум КПД достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения. Коэффициент полезного действия силовых трансформаторов очень высок (98–99%).

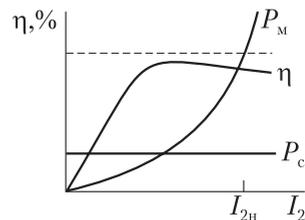
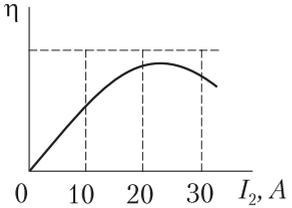


Рис. 10.15

Карточка № 10.9 (289)

Потери энергии и коэффициент полезного действия трансформаторов

Что показывает ваттметр: а) в опыте холостого хода? б) в опыте короткого замыкания?	а) Потери энергии в трансформаторе при номинальной нагрузке; б) то же	66
	а) Потери энергии в сердечнике; б) потери энергии в обмотках	184
Зависят ли от нагрузки потери энергии: а) в обмотках; б) в сердечнике трансформатора?	а) Зависят; б) зависят	73
	а) Не зависят; б) не зависят	127
	а) Зависят; б) не зависят	94
	а) Не зависят; б) зависят	49
 <p>При каком токе нагрузки потери в сердечнике равны потерям в обмотках?</p>	$I_2 = 0$	13
	$I_2 = 10 \text{ A}$	98
	$I_2 = 20 \text{ A}$	126
	$I_2 = 40 \text{ A}$	16
Номинальная мощность на выходе трансформатора $P_2 = 0,97 \text{ кВт}$. В опыте холостого хода ваттметр показывает 0 Вт, в опыте короткого замыкания — 20 Вт. Определите КПД трансформатора при номинальной нагрузке, %.	Для решения задачи недостаточно данных	67
	99	36
	98	65
	97	104

Продолжение карт. № 10.9

Измерена мощность на входе и выходе трансформатора: $P_1 = 10$ кВт; $P_2 = 9,8$ кВт. Определите КПД трансформатора, %.	97	62
	98	81
	99	61
	Для решения задачи недостаточно данных	162

10.10. Трехфазные трансформаторы

В линиях электропередачи используются в основном трехфазные силовые трансформаторы. Внешний вид, конструктивные особенности и компоновка основных элементов этого трансформатора представлены на рис. 10.2. Магнитопровод (сердечник) трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы (рис. 10.16).

Для подключения трансформатора к линиям электропередачи на крышке бака имеются вводы, представляющие собой фарфоровые изоляторы, внутри которых проходят медные стержни. Вводы высшего напряжения обозначают буквами A, B, C , вводы низшего напряжения — буквами a, b, c . Ввод нулевого провода располагают слева от ввода a и обозначают 0 (рис. 10.17).

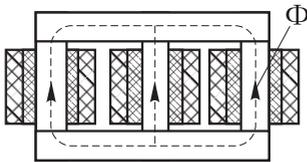


Рис. 10.16

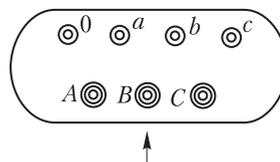


Рис. 10.17

Принцип работы и электромагнитные процессы в трехфазном трансформаторе аналогичны рассмотренным выше. Особенностью трехфазного трансформатора является зависимость коэффициента трансформации линейных напряжений от способа соединения обмоток.

Применяются главным образом три способа соединения обмоток трехфазного трансформатора: 1) соединение первичных и вторичных обмоток звездой (рис. 10.18, a);

2) соединение первичных обмоток звездой, вторичных — треугольником (рис. 10.18, б); 3) соединение первичных обмоток треугольником, вторичных — звездой (рис. 10.18, в).

Обозначим отношение чисел витков обмоток одной фазы буквой k . Эта величина соответствует коэффициенту трансформации однофазного трансформатора и может быть выражена через отношение фазных напряжений:

$$k = \omega_2 / \omega_1 \approx U_{\phi 2} / U_{\phi 1}.$$

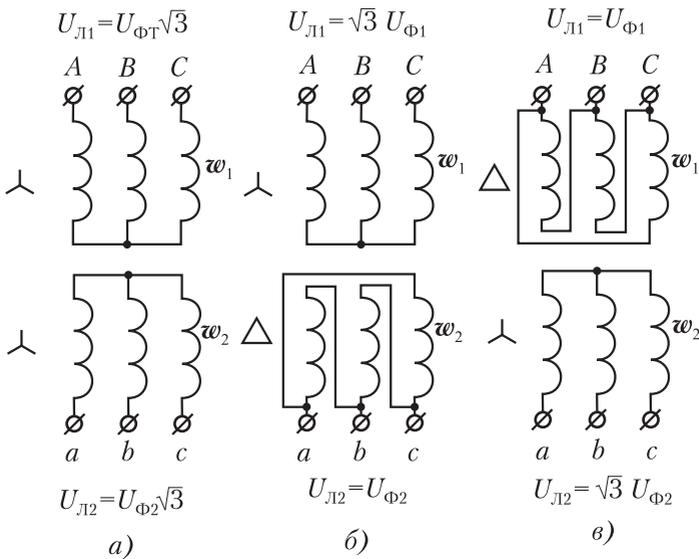


Рис. 10.18

Обозначим коэффициент трансформации линейных напряжений буквой c .

При соединении обмоток по схеме \star / \star

$$c = U_{\text{л2}} / U_{\text{л1}} = \sqrt{3} U_{\text{Ф2}} / \sqrt{3} U_{\text{Ф1}} = k.$$

При соединении обмоток по схеме \star / Δ

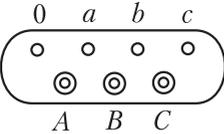
$$c = U_{\text{л2}} / U_{\text{л1}} = U_{\text{Ф2}} / \sqrt{3} U_{\text{Ф1}} = k / \sqrt{3}.$$

При соединении обмоток по схеме Δ / \star

$$c = U_{л2} / U_{л1} = \sqrt{3} U_{ф2} / U_{ф1} = \sqrt{3} k.$$

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в $\sqrt{3}$ раза увеличить или уменьшить его коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

Карточка № 10.10 (245)
Трехфазные трансформаторы

Сколько стержней должен иметь сердечник трехфазного трансформатора?	Один	18
	Два	2
	Три	128
 <p>На рисунке изображена клеммовая панель понижающего трехфазного трансформатора. Какие клеммы должны быть подсоединены к питающей сети?</p>	A, B, C	175
	a, b, c	46
	0, a, b, c	95
Число витков в каждой фазе первичной обмотки 1000, в каждой фазе вторичной обмотки 200. Линейное напряжение питающей сети 1000 В. Определите линейное напряжение на выходе трансформатора.	200 В	6
	5000 В	40
	Для решения задачи недостаточно данных	83
	200/ $\sqrt{3}$ В	148
Решите предыдущую задачу при условии, что обмотки соединены по схеме \wedge/Δ .	1000/ $\sqrt{3}$ В	80
	200 $\sqrt{3}$ В	181
	Для решения задачи недостаточно данных	105

Продолжение карт. № 10.10

Решите предыдущую задачу при условии, что обмотки соединены по схеме Δ/Δ .	$200/\sqrt{3}$ В	84
	$1000/\sqrt{3}$ В	161
	$200\sqrt{3}$ В	11

10.11. Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы

Принципиальная схема автотрансформатора изображена на рис. 10.19. У автотрансформатора часть витков первичной обмотки используется в качестве вторичной обмотки, поэтому помимо магнитной связи имеется электрическая связь между первичной и вторичной цепями. В соответствии с этим энергия из первичной цепи во вторичную передается как при помощи магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, так и непосредственно по проводам.

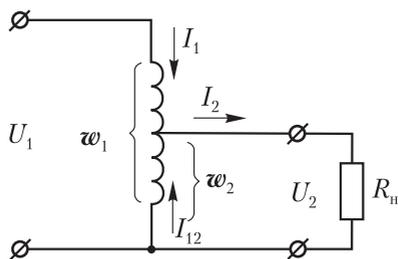


Рис. 10.19

Поскольку формула трансформаторной ЭДС применима к обмоткам автотрансформатора так же, как и к обмоткам трансформатора, коэффициент трансформации автотрансформатора выражается известными отношениями:

$$k = \omega_2/\omega_1 = E_2/E_1 \approx U_2/U_1 \approx I_1/I_2.$$

Вследствие электрического соединения обмоток через часть витков, принадлежащую одновременно первичной и

вторичной цепям, протекают токи I_1 и I_2 , которые направлены встречно и при небольшом коэффициенте трансформации мало отличаются друг от друга по величине. Поэтому их разность оказывается небольшой и обмотку можно выполнить из тонкого провода. Таким образом, при коэффициенте трансформации $k = 1,2-2$ экономится значительное количество меди. При больших коэффициентах трансформации это преимущество автотрансформатора исчезает. Электрическое соединение первичной и вторичной цепей повышает опасность при эксплуатации аппарата, так как при пробое изоляции в понижающем автотрансформаторе оператор может оказаться под высоким напряжением первичной цепи.

Автотрансформаторы применяются для пуска мощных двигателей переменного тока, регулирования напряжения в осветительных сетях, а также в других случаях, когда необходимо регулировать напряжение в небольших пределах.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока применяются для включения измерительных приборов, аппаратуры автоматического регулирования и защиты в высоковольтные цепи. Они позволяют уменьшить размеры и массу измерительных устройств, повысить безопасность обслуживающего персонала, расширить пределы измерения приборов переменного тока.

Измерительные трансформаторы напряжения служат для включения вольтметров и обмоток напряжения измерительных приборов. Поскольку эти обмотки имеют большое сопротивление и потребляют маленькую мощность, можно считать, что трансформаторы напряжения работают в режиме холостого хода. Схема включения и условное обозначение измерительного трансформатора напряжения показаны на рис. 10.20.

Измерительные трансформаторы тока используются для включения амперметров и токовых катушек измерительных приборов. Эти катушки имеют очень маленькое сопротивление, поэтому трансформаторы тока практически работают в режиме короткого замыкания. Схема включения и условное обозначение измерительного трансформатора тока показаны на рис. 10.21.

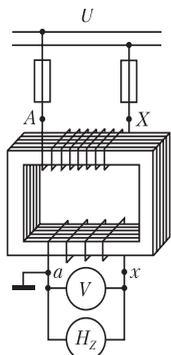


Рис. 10.20

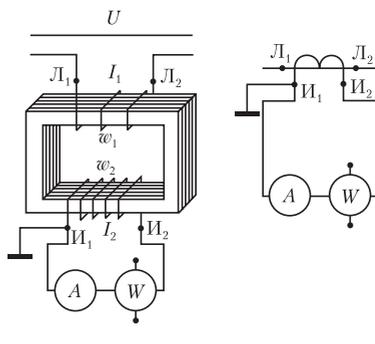
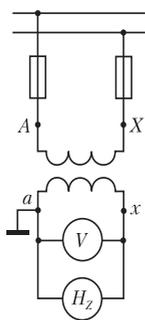


Рис. 10.21

Результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора равен разности магнитных потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками. В нормальных условиях работы трансформатора тока он невелик. Однако при размыкании цепи вторичной обмотки в сердечнике будет существовать только магнитный поток первичной обмотки, который значительно превышает разностный магнитный поток. Потери в сердечнике резко возрастут, трансформатор перегреется и выйдет из строя. Кроме того, на концах оборванной вторичной цепи появится большая ЭДС, опасная для работы оператора. Поэтому трансформатор тока нельзя включать в линию без подсоединенного к нему измерительного прибора. Для повышения безопасности обслуживающего персонала кожух измерительного трансформатора должен быть тщательно заземлен.

Карточка № 10.11 (207)

Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы

Чем принципиально отличается автотрансформатор от трансформатора?	Малым коэффициентом трансформации	113
	Возможностью изменения коэффициента трансформации	88
	Электрическим соединением первичной и вторичной цепей	34

Продолжение карт. № 10.11

Коэффициент трансформации автотрансформатора $k = 10$. а) какая часть витков обмотки является общей для первичной и вторичной цепей; б) какой ток течет по этим виткам?	а) $0,1 \omega_1$; б) $0,9 I_1$	116
	а) $0,9 \omega_1$; б) $0,1 I_1$	155
Какие приборы нельзя подключать к трансформатору напряжения?	Вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, высокоомные обмотки реле	152
	Амперметры, токовые обмотки ваттметров, низкоомные обмотки реле	72
Какой прибор нельзя подключать к трансформатору тока?	Амперметр	97
	Реле с малым входным сопротивлением	29
	Вольтметр	119
	Ваттметр	156
На какие режимы работы рассчитаны: а) трансформатор напряжения; б) трансформатор тока?	а) Холостой ход; б) короткое замыкание	166
	а) Короткое замыкание; б) холостой ход	27
	Это зависит от подключенного измерительного прибора	91

10.12. Сварочные трансформаторы

К источникам питания сварочных аппаратов предъявляются специфические требования: при заданной мощности они должны создавать большие токи в нагрузке, причем резкое изменение сопротивления нагрузки не должно существенно сказываться на величине сварочного тока.

Относительно невысокие напряжения при больших токах обеспечивают не только эффективное тепловыделение в сварочном контакте, но и безопасность сварщика, работающего обычно среди металлических конструкций с высокой электропроводностью.

В соответствии с рассмотренными требованиями сварочные трансформаторы обеспечивают понижение напряжения от 220 или 380 В до 60–70 В. Такое напряжение на зажимах вторичной обмотки устанавливается при холостом ходе сварочного трансформатора. В процессе сварки оно колеблется от максимального значения 60–70 В до значений, близких к нулю.

Сопротивление электрической дуги, возникающей при сварке, изменяется при перемещениях руки сварщика. Если бы напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора поддерживалось неизменным, возникали бы резкие колебания тока в цепи и регулировать тепловыделение было бы невозможно. Поэтому сварочный трансформатор устроен так, что при резком уменьшении сопротивления дуги ток в цепи увеличивается незначительно, а произведение I^2R , определяющее количество тепла, сохраняется на требуемом уровне.

В соответствии с законом Ома при резком уменьшении сопротивления и незначительном увеличении тока напряжение на дуге снижается. Сварочный трансформатор имеет крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 10.22).

Сварочный трансформатор выдерживает короткие замыкания, возникающие в случае прикосновения электрода к сварочному шву. Ток короткого замыкания, как показывает внешняя характеристика, ограничен. Вторичная обмотка трансформатора рассчитана на достаточно длительное протекание этого тока.

При постоянном напряжении питающей сети быстрое снижение выходного напряжения трансформатора при незначительном возрастании тока может быть достигнуто только за счет увеличения внутреннего падения напряже-

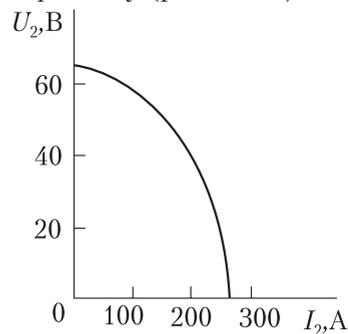


Рис. 10.22

ния в обмотках трансформатора. Для этого нужно увеличить сопротивление обмоток.

Сварочные трансформаторы изготавливают с большим и регулируемым сопротивлением обмоток. При этом увеличивают не активное сопротивление проводов, а индуктивное сопротивление рассеяния обмоток, так как увеличение активного сопротивления привело бы к возрастанию потерь энергии и перегреву трансформатора.

Для увеличения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток увеличивают поток рассеяния, вводя в сердечник трансформатора шунтирующий магнитопроводящий стержень, через который замыкается часть основного магнитного потока. Изменяя величину воздушного зазора в шунтирующем стержне, можно изменять величину магнитного потока рассеяния. Средний подвижный стержень, играющий роль магнитного шунта, предусмотрен, например, в конструкции отечественного сварочного трансформатора СТАН-1.

Применяют и другие способы изменения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток. Так, в трансформаторе СТЭ в цепь вторичной обмотки включают специальный дроссель с регулируемым воздушным зазором, а в трансформаторе ТС-500 изменяют расстояние между первичной и вторичной обмотками.

Карточка № 10.12 (262) Сварочные трансформаторы

Почему для сварки используются трансформаторы с крутопадающей внешней характеристикой?	Для получения на вторичной обмотке устойчивого напряжения 60–70 В	48
	Для ограничения тока короткого замыкания	14
Почему сварочный трансформатор рассчитывают на сравнительно небольшое вторичное напряжение (укажите неверный ответ)?	Для повышения при заданной мощности величины сварочного тока	157
	Для улучшения условий безопасной работы сварщика.	93
	Для получения крутопадающей внешней характеристики	139

Продолжение карт. № 10.12

Почему для получения крутопадающей внешней характеристики целесообразно увеличивать индуктивное, а не активное сопротивление обмоток трансформатора?	По конструктивным соображениям	169
	Для уменьшения тепловых потерь	180
Как изменяют индуктивное сопротивление рассеяния обмоток в трансформаторе СТАН-1?	Измерением воздушного зазора в дросселе	133
	Изменением расстояния между обмотками	60
	Изменением воздушного зазора в магнитном шунте	179
Какие однофазные сварочные трансформаторы выпускаются отечественной промышленностью?	СТЭ	167
	СТАН-1; ТС-500	187
	Все перечисленные марки	150

ГЛАВА 11

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

11.1. Сущность и значение электрических измерений

Для измерения электрических и магнитных величин служат электроизмерительные приборы: амперметры, вольтметры, гальванометры и др., а также их комбинации.

Процесс измерения состоит в сравнении измеряемой физической величины с ее значением, принятым за единицу.

Измерение одной величины можно заменить измерением другой, с ней связанной. Как правило, всякое измерение в конечном счете сводят к измерению перемещения стрелки или светового пятна по шкале.

Измерительная аппаратура разделяется на измерительные приборы и эталоны.

Измерительные приборы обладают высокой точностью и надежностью работы, возможностью автоматизации процесса измерений и передачи показаний на дальние расстояния, простотой ввода результатов измерений в электрические вычислительные устройства и т.д. Поэтому они широко используются в системах ручного или автоматического контроля и поддержания на заданном уровне параметров промышленных установок и технологических процессов.

С помощью измерительных устройств контролируется качество и количество выпускаемой продукции, соответствие ее характеристик установленным нормам. Разработаны и применяются электрические измерители влажности, температуры, давления и т.д.

Первостепенную роль электрические измерения играют в области научных исследований. Сложнейшие установки ядерной физики, наземные и бортовые измерительные комплексы для запуска и контроля параметров космических кораблей, тонкие эксперименты с живой материей в медицине и биологии — все это невозможно без совершенной электроизмерительной техники.

Карточка № 11.1 (275)

Сущность и значение электрических измерений

Что такое электрические измерения?	Сравнение измеряемой величины с ее значением, принятым за единицу	194
	Способ оценки физических величин	227
	Измерения величин, характеризующих электрические и магнитные явления	183
Какой прибор используется для измерения электрической мощности?	Амперметр	204
	Вольтметр	215
	Ваттметр	238
	Счетчик	172
Какие достоинства характерны для электроизмерительных приборов?	Высокая точность и надежность работы	131
	Возможность передачи показаний на дальние расстояния	152
	Удобство сопряжения с вычислительными машинами и устройствами автоматики	101
	Все перечисленные достоинства	121
Где применяются электроизмерительные приборы?	Для контроля параметров технологических процессов	21
	Для контроля параметров космических объектов	81
	Для экспериментальных исследований в физике, химии, биологии и др	11
	Во всех перечисленных областях	71
Назовите основные единицы измерения в СИ.	Метр, килограмм, секунда ампер	162
	Сантиметр, грамм, секунда, ампер	91
	Метр, килограмм, секунда, вольт	51
	Все перечисленные единицы	41

11.2. Основные методы электрических измерений. Погрешности измерительных приборов

Существует два основных метода электрических измерений: *метод непосредственной оценки* и *метод сравнения*. В методе непосредственной оценки измеряемая величина отсчитывается непосредственно по шкале прибора. При этом шкала измерительного прибора предварительно градуируется по эталонному прибору в единицах измеряемой величины. Как правило, такая градуировка производится на заводе при изготовлении прибора. Достоинства этого метода — удобство отсчета показаний прибора и малая затрата времени на операцию измерения. Метод непосредственной оценки широко применяется в различных областях техники для контроля и регулирования технологических процессов, в полевых условиях, на подвижных объектах и т.д. Недостаток метода — сравнительно невысокая точность измерений.

В методе сравнения измеряемая величина сравнивается непосредственно с эталоном, образцовой или рабочей мерой. В этом случае точность измерений может быть значительно повышена. Метод сравнения используется главным образом в лабораторных условиях, он требует сравнительно сложной аппаратуры, высокой квалификации операторов и значительных затрат времени. В последнее время метод сравнения автоматизирован.

Практика показывает, что при всяком измерении непрерывной величины неизбежна некоторая погрешность Δ — разница между измеренным $A_{из}$ и действительным A значениями измеряемой величины:

$$\Delta = A_{из} - A.$$

Эта разница носит название абсолютной погрешности измерения. Она определяется систематическими и случайными погрешностями прибора, а также ошибками оператора.

Систематические погрешности изменяются по определенному закону и возникают вследствие факторов, которые могут быть учтены: влияние внешних условий (температу-

ра, радиация, электромагнитные поля), несовершенство метода измерения, несовершенство измерительного прибора.

Случайные погрешности возникают вследствие факторов, которые не поддаются непосредственному учету. Оценку случайных погрешностей можно произвести только при очень большом числе повторяющихся измерений, используя методы теории вероятностей.

Ошибки оператора (в записи, в определении цены деления прибора и др.), обычно легко выявляемые в ряду наблюдений по значительным отклонениям результата измерения от средних или примерно ожидаемых значений, исключают из записей и при обработке результатов измерения не учитывают.

Для более полной характеристики измерений вводят понятие относительной погрешности измерения δ :

$$\delta = \frac{A_{\text{из}} - A}{A} \cdot 100 = \frac{\Delta}{A} \cdot 100\%.$$

Величины Δ и δ характеризуют точность измерения. Во многих случаях возникает необходимость охарактеризовать точность прибора. Для этой цели вводится понятие приведенной погрешности измерения:

$$\delta_{\text{п}} = \frac{\Delta}{A_{\text{м}}} \cdot 100\%,$$

где $A_{\text{м}}$ — максимальное значение шкалы прибора, т.е. предельное значение измеряемой величины.

Наибольшая приведенная погрешность определяет класс точности прибора. Если, например, класс точности амперметра равен 1,5, то это означает, что наибольшая приведенная погрешность $\delta_{\text{п}} = 1,5\%$. Если прибор рассчитан на измерение токов до 15 А, то абсолютная погрешность измерения этим прибором составит

$$\Delta = A_{\text{м}} \frac{\delta_{\text{п}}}{100} = 15 \frac{1,5}{100} = 0,225 \text{ А}.$$

Если указанным прибором измерить ток 10 А, то относительная погрешность измерения не превысит

$$\frac{0,225}{10} \cdot 100 = 2,25\%;$$

если тем же прибором измерить ток 1 А, то относительная погрешность измерения не превысит

$$\frac{0,225}{1} \cdot 100 = 22,5\%.$$

Этот пример показывает, что при точных измерениях прибор надо подбирать так, чтобы измеряемая величина приходилась на вторую половину шкалы.

Различают основную и дополнительную приведенные погрешности. Основная приведенная погрешность возникает при нормальных условиях работы, указанных в паспорте прибора и условными знаками на шкале. Дополнительные погрешности возникают при эксплуатации прибора в условиях, отличных от нормальных (повышенная температура окружающей среды, сильные внешние магнитные поля, неправильная установка прибора и др.).

Карточка № 11.2 (181)

Основные методы электрических измерений. Погрешности измерительных приборов

Какие методы применяются: а) в лабораториях для точных измерений; б) на подвижных объектах?	а) Метод сравнения; б) метод непосредственной оценки	142
	а) Метод непосредственной оценки; б) метод сравнения	111
Чем характеризуется точность измерения?	Условиями эксперимента	31
	Качеством измерительного прибора	61
	Относительной погрешностью измерения	1
	Точностью отсчета	195
В цепи протекает ток 20 А. Амперметр показывает 20,1 А. Шкала прибора 0–50 А. Укажите: а) точность измерения; б) точность прибора.	а) 0,1 А; б) 0,1 А	228
	а) 0 5%; б) 0,2%	184
	а) 0,05 А; б) 0,02 А	205
	а) 5%; б) 0,2%	216

Продолжение карт. № 11.2

Класс точности прибора 1,0. Чему равна приведенная погрешность прибора?	1	239
	1,5	173
	1%	132
Шкала амперметра 0–50 А. Прибором измерены токи: 1) 3 А; 2) 30 А. Какое измерение точнее?	Задача не определена, так как неизвестен класс точности прибора	153
	Первое	102
	Второе	122

11.3. Классификация электроизмерительных приборов. Условные обозначения на шкале

Электроизмерительные приборы классифицируются по различным признакам.

В зависимости от основной приведенной погрешности электроизмерительные приборы разбиты на 8 классов точности:

Класс точности.....	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0
Наибольшая приведенная погрешность, %.....	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$

В зависимости от принципа действия имеются следующие наиболее употребительные системы приборов: магнитоэлектрическая; электромагнитная; электродинамическая; термоэлектрическая; индукционная; электростатическая; тепловая; электронная.

По роду измеряемой величины электроизмерительные приборы делятся на: вольтметры (для измерения напряжения и ЭДС); амперметры (для измерения силы тока); ваттметры (для измерения электрической мощности); счетчики (для измерения электрической энергии); омметры, мегомметры (для измерения электрического сопротивления); частотомеры (для измерения частоты переменного тока); фазометры (для измерения угла сдвига фаз).

По роду тока различают электроизмерительные приборы постоянного тока, переменного тока и комбинированные.

По способу установки различают: щитовые приборы, предназначенные для монтажа на приборных щитах и пультах управления, и переносные приборы.

На шкалу электроизмерительного прибора наносятся условные обозначения, основные из которых приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

Условные обозначения на шкале электроизмерительного прибора

1,5	Класс точности 1,5
—	Постоянный ток
⌒	Постоянный и переменный токи
~	Переменный (однофазный) ток
≡	Трехфазный ток
	Прибор магнитоэлектрической системы
	Прибор электромагнитной системы
	Прибор электродинамической системы
	Прибор индукционной системы
□, ⊥, $\angle 60^\circ$	Прибор устанавливается горизонтально, вертикально, под углом 60°
	Изоляция прибора испытана при напряжении 2 кВ
А	Для закрытых отапливаемых помещений
Б	Для закрытых неотапливаемых помещений
В	Для полевых и морских условий
S → N	Ориентация прибора в земном магнитном поле

Карточка № 11.3 (221)

Классификация электроизмерительных приборов.
Условные обозначения на шкале

Укажите наибольшую приведенную погрешность для приборов классов точности 0,2; 1,0; 2,5.	0,002; 0,01; 0,025	22
	0,2%; 1%; 2,5%	82
	$\pm 0,2\%$; $\pm 1\%$; $\pm 2,5\%$	12
Как классифицируются приборы по принципу действия?	Вольтметры, амперметры, ваттметры, счетчики, омметры, частотомеры	72
	Приборы магнитоэлектрической, электродинамической, электромагнитной и других систем	163
На шкале прибора нанесен знак  Какой это прибор?	Амперметр	92
	Прибор электромагнитной системы	52
	Прибор переменного тока	42
На шкале прибора нанесен знак  Что это означает?	Максимальный измеряемый ток 5 А	143
	Максимальное измеряемое напряжение 5000 В	112
	Изоляция прибора выдерживает 5 кВ	32
Может ли влиять на показание прибора его ориентация в горизонтальной плоскости?	Может	62
	Не может	2

11.4. Электроизмерительные приборы непосредственной оценки, общие принципы устройства

Подвижная система электроизмерительного прибора непосредственной оценки, связанная с указателем (стрелкой), подвержена действию различных моментов сил.

Вращающий момент $M_{вр}$ в приборе создается благодаря использованию того или иного проявления электрического

тока. Способ создания вращающего момента определяет принцип действия прибора.

Противодействующий момент $M_{\text{пр}}$ в приборе создается закручиванием или растяжением пружинок, а иногда — взаимодействием специальной катушки с током от магнитной системы прибора (в логометрах). Во время отсчета по прибору, когда стрелка неподвижна, вращающий и противодействующий моменты уравновешивают друг друга:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}.$$

В отсутствие противодействующего момента работа прибора невозможна, так как при любом значении измеряемой величины стрелка отклонялась бы до упора.

Успокаивающий (демпфирующий) момент необходим для устранения инерционных колебаний стрелки возле положения равновесия. Этот момент должен действовать во время движения стрелки и исчезать при отсчете, чтобы не вносить погрешностей в измерения. Некоторый демпфирующий момент всегда создается в результате трения подвижной системы о воздух. В большинстве случаев этого недостаточно, вследствие чего для успокоения подвижной системы приходится применять специальное устройство (демпфер). Демпфирующий момент пропорционален скорости движения подвижной системы. При отсутствии демпфирующего момента отсчет показаний по прибору был бы затруднен.

Широко применяются воздушный и электромагнитный демпферы.

В воздушном демпфере поршень, связанный с подвижной системой, перемещается в камере, не касаясь ее стенок. Демпфирующий момент создается за счет перепада давлений по обе стороны поршенька. Когда стрелка неподвижна, давление по обе стороны поршенька выравнивается и демпфирующий момент исчезает.

В электромагнитном демпфере демпфирующий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с магнитным полем вихревых токов, индуцируемых в пластине при движении подвижной системы.

В приборах магнитоэлектрической системы демпфером служит металлический каркас подвижной рамки, в котором индуцируются вихревые токи при вращении рамки в поле постоянного магнита.

Если пластина или рамка неподвижна, то вихревые токи не индуцируются и демпфирующий момент отсутствует.

Подвижная система измерительного прибора крепится на оси, выполняемой в виде тонкой медной или алюминиевой трубочки, в которую завальцовываются стальные керны (рис. 11.1). Концы кернов опираются на подпятники из твердого камня, обычно агата (рис. 11.2). На рисунке обозначены: стопорный винт (1); агатовый камень (2); керн (3); винт подпятника (4). Винт подпятника затягивают так, чтобы обеспечивалась свобода для колебаний размеров оси при изменении температуры.

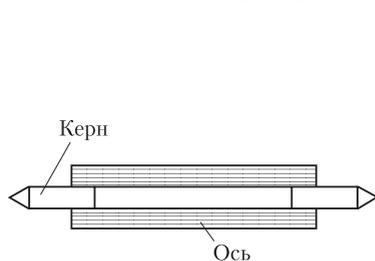


Рис. 11.1

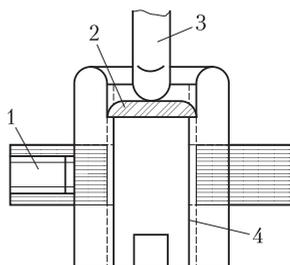


Рис. 11.2

Подвижная система должна быть точно сбалансирована относительно оси, для чего служат специальные балансировочные грузики — гайки.

Пружинки для создания противодействующего момента обычно изготавливаются в виде спиралей из немагнитного материала, обладающего достаточной упругостью (чаще всего из фосфористой бронзы).

Для устранения влияния на показания прибора внешних магнитных полей применяют магнитные экраны из мягкого железа. Механизм прибора помещают в корпус для защиты от влаги, пыли и механических повреждений.

Карточка № 11.4 (192)

Электроизмерительные приборы непосредственной оценки. Общие принципы устройства

Какие моменты действуют на подвижную систему электроизмерительного прибора?	Вращающий	196
	Вращающий и противодействующий	229
	Вращающий, противодействующий и демпфирующий	185

Продолжение карт. № 11.4

Какие моменты действуют на подвижную систему электроизмерительного прибора при отсчете показаний (когда стрелка неподвижна)?	Вращающий	206
	Вращающий и противодействующий	217
	Вращающий, противодействующий и демпфирующий	240
Что произойдет, если упругие токоподводящие пружинки из фосфористой бронзы заменить мягкой медной фольгой?	Точность прибора уменьшится	174
	Точность прибора увеличится	133
	При любом токе стрелка будет отклоняться до упора	154
Нужен ли зазор между керном и подпятником?	Не нужен	103
	Нужен	123
	Зазор существует ввиду невозможности точного изготовления деталей	23
Какие материалы используются для экранирования приборов от внешних магнитных полей?	Магнитотвердые	83
	Магнитомягкие	13

11.5. Приборы магнитоэлектрической системы

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на использовании взаимодействия поля постоянного магнита и катушки (рамки), по которой протекает ток.

Устройство прибора схематически изображено на рис. 11.3. Между полюсами постоянного магнита NS с помощью полюсных наконечников 1 и цилиндрического сердечника 2 создается воздушный зазор такой формы, что силовые линии магнитного поля при любом положении рамки 3 перпендикулярны к ее проводникам.

Сила, действующая на одну сторону рамки в магнитном поле, определяется законом Ампера:

$$F = IlB\omega,$$

где I — ток в проводниках рамки; l — длина той стороны рамки, которая находится в магнитном поле (активная дли-

на); B — магнитная индукция в воздушном зазоре; w — число витков рамки.

На вторую сторону рамки действует такая же сила, но противоположно направленная.

Момент сил определяется как произведение силы на плечо. Следовательно,

$$M_{\text{вр}} = Fp = \Pi B p w = BS w I.$$

Здесь p — ширина рамки; $S = lp$ — площадь рамки.

Величины B , S , w для каждого прибора постоянны, поэтому последнюю формулу можно записать в виде

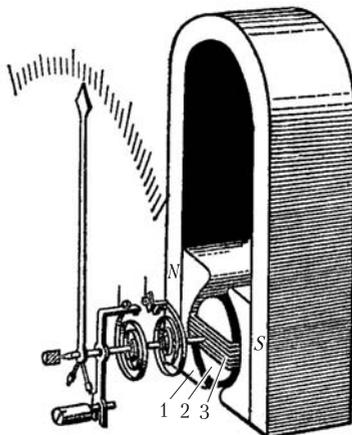


Рис. 11.3

$$M_{\text{вр}} = k_1 I,$$

где k_1 — некоторый постоянный коэффициент.

Ток к рамке подводится через две спиральные пружинки, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Момент, создаваемый пружинкой, пропорционален углу закручивания пружины, поэтому

$$M_{\text{пр}} = k_2 \alpha,$$

где k_2 — некоторый постоянный коэффициент; α — угол поворота рамки (равный углу закручивания пружины).

Учитывая, что в момент отсчета, когда стрелка неподвижна, $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, получаем

$$k_1 = k_2 \alpha.$$

Из этого равенства находим

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I = k I.$$

Таким образом, угол поворота рамки и стрелки-указателя пропорционален току, т.е. прибор может быть отградуирован как амперметр.

На основании закона Ома имеем

$$I = U / R_{\text{п}},$$

где U — напряжение на зажимах прибора; $R_{\text{п}}$ — электрическое сопротивление рамки прибора.

После подстановки получаем

$$\alpha = \frac{k}{R_{\text{п}}} U.$$

Поскольку отношение $k / R_{\text{п}}$ для данного прибора — величина постоянная, последнее выражение показывает, что прибор может быть отградуирован как вольтметр.

Демпфирующий момент в магнитоэлектрических приборах создается обычно за счет вихревых токов, возникающих в алюминиевом каркасе рамки при перемещениях подвижной системы.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры являются основными измерительными приборами в цепях постоянного тока.

Приборы магнитоэлектрической системы обладают высокой точностью, высокой чувствительностью, малым собственным потреблением энергии. Они имеют равномерную шкалу, их показания мало зависят от влияния внешних магнитных полей. Основным недостатком этих приборов — невозможность измерений в цепях переменного тока.

Для измерений в цепях переменного тока магнитоэлектрические приборы включают через выпрямители. Высокочувствительный магнитоэлектрический прибор, соединенный с выпрямительной схемой, получил название прибора выпрямительной системы. Выпрямительные элементы (диоды) монтируются в корпусе прибора и обеспечивают однопериодное или двухполупериодное выпрямление переменного тока.

Приборы выпрямительной системы находят широкое применение. Обычно их изготавливают комбинированными, т.е. предназначенными для измерения тока, напряжения, сопротивления в цепях постоянного и переменного тока с различными пределами измерения.

Выпрямительные схемы вносят дополнительные погрешности в измерения, поэтому класс точности приборов выпрямительной системы относительно невысок и обычно составляет 1,5—2,5.

Карточка № 11.5 (243)

Приборы магнитоэлектрической системы

На чем основан принцип действия приборов магнитоэлектрической системы?	На взаимодействии постоянного магнита и рамки, по которой протекает ток	73
	На взаимодействии магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника	164
	На взаимодействии проводников, по которым протекает ток	93
Можно ли магнитоэлектрический амперметр отградуировать как вольтметр?	Можно	53
	Нельзя	43
	Можно, если перемотать рамку	144
Чему пропорциональны: а) противодействующий момент; б) вращающий момент; в) угол отклонения стрелки?	а) α ; б) I ; в) I	113
	а) α ; б) α ; в) I	33
	а) I ; б) I ; в) I	63
Можно ли алюминиевый каркас рамки прибора магнитоэлектрической системы заменить пластмассовым?	Можно	3
	Нельзя	197
Можно ли магнитоэлектрический прибор использовать для измерений в цепях переменного тока?	Можно	230
	Нельзя	186
	Можно, если прибор подключать через выпрямительную схему	207

11.6. Приборы электромагнитной системы

В основе работы приборов электромагнитной системы лежит принцип механического взаимодействия магнитного поля и ферромагнитного материала.

Устройство прибора схематически изображено на рис. 11.4. Сердечник 3 из магнитомягкого материала втягивается в катушку 1 при протекании тока по ее обмотке. Противодействующий момент создается пружиной 2.

Демпфирование осуществляется воздушным демпфером 4, представляющим собой гильзу, в которой может перемещаться легкий поршень, связанный со стрелкой.

Вращающий момент пропорционален квадрату тока, так как магнитные поля катушки и сердечника создаются одним и тем же измеряемым током, протекающим по катушке:

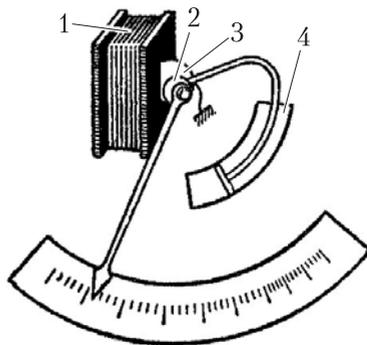


Рис. 11.4

$$M_{\text{вр}} = k_1 I^2, M_{\text{пр}} = k_2 \alpha;$$

$$k_1 I^2 = k_2 \alpha;$$

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I^2 = k I^2 = \frac{k}{R_{\text{II}}} U^2.$$

Последнее выражение показывает, что угол отклонения стрелки пропорционален квадрату силы тока или напряжения. Шкала прибора квадратичная, сжатая вначале.

Приборы электромагнитной системы широко применяются для измерений в цепях постоянного и переменного токов. Они просты и надежны, обладают высокой перегрузочной способностью и механической прочностью. Однако этим приборам присущ ряд недостатков, основными из которых являются низкая чувствительность, невысокая

точность, значительное собственное потребление энергии, неравномерность шкалы.

Карточка № 11.6 (164)

Приборы электромагнитной системы

На чем основан принцип действия приборов электромагнитной системы?	На взаимодействии магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника	218
	На взаимодействии постоянного магнита и рамки, по которой протекает ток	241
	На взаимодействии проводников, по которым протекает ток	175
Укажите основные детали прибора электромагнитной системы (без которых работа прибора невозможна).	Катушка, сердечник, стрелка, шкала.	134
	Катушка, сердечник, демпфер, стрелка	155
	Катушка, сердечник, пружина, стрелка	124
	Катушка, сердечник, пружина, демпфер	104
Чему пропорциональны: а) противодействующий момент; б) вращающий момент; в) угол отклонения стрелки?	а) α ; б) I^2 ; в) I^2	24
	а) α ; б) α ; в) I^2	84
	а) I^2 ; б) I^2 ; в) I^2	14
Можно ли прибор электромагнитной системы использовать для измерений: а) в цепях переменного тока; б) в цепях постоянного тока?	а) Можно; б) можно	74
	а) Можно; б) нельзя	165
	а) Нельзя; б) можно	94
	а) Нельзя; б) нельзя	235
Может ли зазор между поршнем и цилиндром в воздушном демпфере: а) быть большим; б) отсутствовать?	а) Может; б) не может	54
	а) Не может; б) не может	44
	а) Не может; б) может	145

11.7. Приборы электродинамической системы

Приборы электродинамической системы основаны на принципе механического взаимодействия проводников, по которым протекает ток.

Устройство прибора поясняется рис. 11.5. Катушка 2 неподвижна, катушка 3 помещается на оси и может поворачиваться вместе с закрепленной на ней стрелкой. Ток к подвижной катушке подводится с помощью пружинок 1, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Успокоение подвижной системы осуществляется воздушным демпфером 4.

Амперметры и вольтметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу.

Широко распространены электродинамические ваттметры — приборы для измерения электрической мощности в цепях постоянного и переменного токов. Электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Основное достоинство приборов электродинамической системы — большая точность измерений в цепях переменного тока. К недостаткам этих приборов следует отнести значительное собственное потребление энергии и подверженность воздействию внешних магнитных полей.

Разновидностью приборов электродинамической системы являются ферродинамические приборы, у которых для повышения величины вращающего момента магнитный поток неподвижной катушки создается в специальном магнитопроводе.

Конструкция ферродинамического прибора напоминает конструкцию прибора магнитоэлектрической системы, у которого постоянный магнит заменен электромагнитом. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод ферродинамического прибора изготавливают из тонких листов электротехнической стали или прессуют из ферромагнитного порошка с электроизоляционным наполнителем.

Ферромагнитный сердечник вносит дополнительные погрешности в измерения, однако применение высококачественных материалов и совершенной технологии изготовления

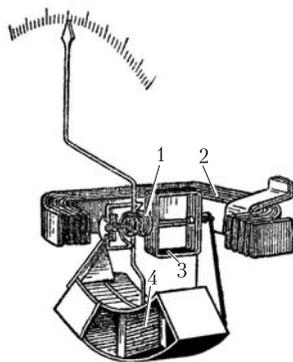


Рис. 11.5

позволяет получить ферродинамические ваттметры класса точности 0,2.

Существенным недостатком приборов ферродинамической системы является зависимость их параметров от частоты измеряемого тока.

Карточка № 11.7 (127)

Приборы электродинамической системы

На чем основан принцип действия приборов электродинамической системы?	На взаимодействии магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника	114
	На взаимодействии проводников, по которым протекает ток	34
	На взаимодействии постоянного магнита и рамки, по которой протекает ток	64
Укажите основные детали прибора электродинамической системы (без которых работа прибора невозможна).	Подвижная катушка, стрелка, пружина, демпфер	4
	Неподвижная катушка, подвижная катушка, пружина, стрелка	198
	Подвижная катушка, неподвижная катушка, пружина, демпфер	231
Можно ли каркас подвижной рамки прибора с воздушным демпфером сделать пластмассовым?	Нельзя	187
	Можно	208
Какую шкалу имеют: а) ваттметры; б) вольтметры; в) амперметры электродинамической системы?	а) Равномерную; б) квадратичную; в) квадратичную	219
	а) Квадратичную; б) равномерную; в) квадратичную	220
	а) Равномерную; б) равномерную; в) равномерную	242

Продолжение карт. № 11.7

Можно ли приборы электродинамической системы применять для измерений: а) в цепях переменного тока; б) в цепях постоянного тока?	а) Можно; б) нельзя	176
	а) Можно; б) можно	135
	а) Нельзя; б) можно	156

11.8. Цифровые приборы

Цифровые электроизмерительные приборы измеряют значения непрерывно изменяющейся величины в отдельные (дискретные) моменты времени и представляют полученный результат в цифровой форме.

Представление непрерывно изменяющейся физической величины в виде последовательности ее дискретных значений, отличающихся друг от друга на небольшую долю, называется квантованием измеряемой величины по уровню и по времени. Обычно интервал времени между соседними измерениями выбирают таким, чтобы отклонение изменяющейся величины от фиксированного измеренного значения не превышало заданной погрешности измерения.

Основное достоинство цифровых приборов заключается в том, что результат измерения может подвергаться дальнейшим физическим и математическим преобразованиям без увеличения погрешности, так как цифровое значение величины может быть с любой степенью точности представлено последовательностью сигналов (например, импульсов), каждый из которых может иметь существенные искажения.

Основными элементами цифровых электроизмерительных приборов являются триггеры, логические схемы, бесконтактные ключи и цифровые указатели.

Триггеры представляют собой электронные схемы с двумя устойчивыми состояниями, одно из которых соответствует цифре 0, другое — цифре 1. Из этих двух цифр в двоичной системе счисления можно построить любое число. Логические схемы позволяют перевести эти числа в десятичную систему и отобразить на цифровых индикаторах в привычной форме.

В качестве цифровых индикаторов широкое применение находят электронные лампы с фигурными электродами, имеющими форму цифр от 0 до 9.

В настоящее время промышленностью выпускаются главным образом цифровые вольтметры. Разработаны и находят применение также цифровые амперметры, омметры, частотомеры, фазометры и другие приборы.

Применение цифровых приборов с дискретным отсчетом позволило создать многоканальные автоматические устройства для централизованного контроля многих параметров, характеризующих сложные технологические процессы. Измерение параметров производится поочередно с заданной дискретностью по времени.

Цифровые электроизмерительные приборы имеют высокую точность (погрешность от 0,1 до 1%), большое быстродействие, широкие пределы измерений, легко комплектуются с цифровыми вычислительными машинами, позволяют передавать результаты без искажений на неограниченные расстояния.

К недостаткам этих приборов следует отнести их сравнительную сложность и высокую стоимость.

Карточка № 11.8 (158)

Цифровые приборы

В чем заключается сущность работы цифрового электроизмерительного прибора?	В цифровом изображении измеряемой величины	105
	В квантовании измеряемой величины по времени и по уровню	125
Измеряются: а) медленно меняющиеся величины; б) быстро меняющиеся величины. В каком случае квант времени должен быть выбран меньшим?	Безразлично	25
	В случае а)	85
	В случае б)	15
Показания обычного и цифрового вольтметров передаются по проводам на дальнейшее расстояние. Какой отсчет точнее, если класс точности приборов одинаков?	Обычным вольтметром	75
	Цифровым вольтметром	166
	Точность отсчетов одинакова	95

Продолжение карт. № 11.8

В какой системе счисления производятся:	а) В двоичной;	55
	б) в двоичной	
а) обработка результатов измерения в схеме цифрового прибора;	а) В двоичной;	45
	б) в десятичной	
б) представление результатов на индикаторе?	а) В десятичной;	146
	б) в двоичной	
Какое достоинство не свойственно цифровым электроизмерительным приборам?	Многоканальность	115
	Простота сопряжения с ЦВМ	35
	Простота телеизмерений	65
	Простота устройства и небольшая стоимость	5

11.9. Измерение напряжений, токов и мощности

Для измерения величины тока в какой-либо ветви электрической цепи амперметр включается последовательно с ее элементами. В частности, для измерения тока нагрузки амперметр включается последовательно с потребителем (рис. 11.6, *а*). Чтобы включение амперметра не искажало режима работы электрической цепи, его сопротивление должно быть возможно малым.

Вольтметр включается параллельно той ветви электрической цепи, напряжение на которой необходимо измерить (рис. 11.6, *б*). Чтобы включение вольтметра не приводило к изменению токов в цепи, его сопротивление должно быть значительно больше сопротивления ветви, параллельно которой подключен измерительный прибор.

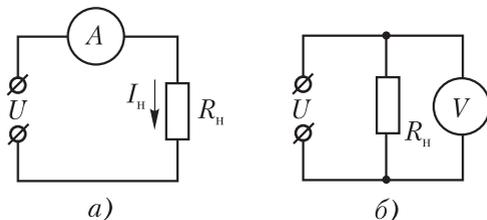


Рис. 11.6

Для измерения мощности в цепях постоянного и однофазного переменного токов используются ваттметры электродинамической системы. Схема включения и внешний вид ваттметра электродинамической системы представлены соответственно на рис. 11.7, а, б. Неподвижная (амперметровая) обмотка ваттметра включается в цепь последовательно, подвижная (вольтметровая) обмотка — параллельно потребителю. В соответствии с этим на лицевую панель ваттметра выведены четыре зажима, два из которых обозначены символом I (токовые зажимы), а два других — символом U (зажимы напряжения). Два зажима помечены точками и называются генераторными.

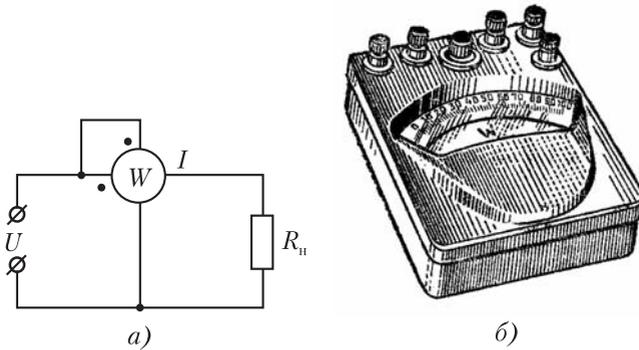


Рис. 11.7

Чтобы понять назначение генераторных зажимов, рассмотрим две возможные схемы включения обмоток ваттметра, изображенные на рис. 11.8. В схеме рис. 11.8, а мощность, измеряемая ваттметром,

$$P_{\text{изм}} = U_V I_A = (U_n + I_n R_A) I_n = U_n I_n + I_n^2 R_A$$

больше мощности нагрузки $P_n = U_n I_n = I_n^2 R_n$ на величину $\Delta P = I_n^2 R_A$. Следовательно,

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_n} = \frac{I_n^2 R_A}{I_n^2 R_n} = \frac{R_A}{R_n}.$$

В схеме рис. 11.8, б мощность, измеряемая ваттметром,

$$P_{\text{изм}} = U_V I_A = U_H (I_H + I_V) = U_H I_H + U_H I_V$$

больше мощности нагрузки $P_H = U_H I_H$ на величину $\Delta P = U_H I_V$, т.е.

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_H} = \frac{U_H I_V}{U_H I_H} = \frac{I_V}{I_H} = \frac{R_H}{R_V}$$

Таким образом, в обоих случаях возникает систематическая погрешность, зависящая от схемы соединения.

Градуировка ваттметров производится по схеме рис. 11.8, а. Для получения такой схемы генераторные зажимы (помеченные точками) следует объединить и подключить к одному и тому же проводу. Вместе с тем генераторные зажимы являются началами обмоток. При правильном включении ваттметра стрелка будет отклоняться вправо. Чтобы изменить направление отклонения стрелки, необходимо изменить направление тока в любой из обмоток ваттметра.

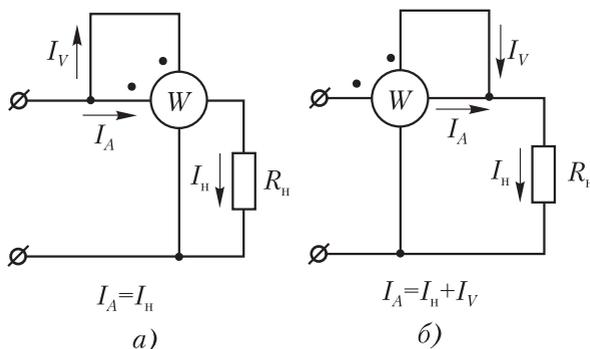


Рис. 11.8

Карточка № 11.9 (331)

Измерение напряжений, токов и мощности

Как включаются в электрическую цепь: а) амперметр; б) вольтметр?	а) Последовательно с нагрузкой;	199
	б) параллельно нагрузке	
	а) Последовательно с нагрузкой;	232
	б) то же	
а) Параллельно нагрузке;	188	
б) то же		

Продолжение карт. № 11.9

Какое сопротивление должны иметь: а) вольтметр; б) амперметр?	а) Большое; б) большое	209
	а) Малое; б) малое	221
	а) Большое; б) малое	243
Какую мощность измеряет электродинамический ваттметр?	Активную	177
	Реактивную	136
	Полную	157
Как включается: а) подвижная; б) неподвижная обмотки ваттметра?	а) Последовательно; б) последовательно	106
	а) Последовательно; б) параллельно	126
	а) Параллельно; б) последовательно	26
Сопротивление нагрузки 10 Ом. Сопротивление неподвижной обмотки ваттметра 0,1 Ом, сопротивление подвижной обмотки 1000 Ом. Определите систематическую погрешность измерения мощности.	$\delta = 1\%$	86
	$\delta = 0,1\%$	16
	$\delta = 10\%$	76

11.10. Расширение пределов измерения приборов непосредственной оценки

Обмотка амперметра рассчитана на небольшие токи. Для увеличения пределов измерения амперметра применяют шунты. Рисунок 11.9 поясняет вывод формулы сопротивления шунта. Обозначения на рисунке: $R_{ш}$ — сопротивление шунта; R_A — сопротивление амперметра; I — измеряемый ток; $I_{ш}$ — ток, протекающий через шунт; I_A — максимально допустимый ток амперметра; $n = I/I_A$ — коэффициент расширения пределов измерения амперметром.

В соответствии с рис. 11.9 имеем

$$I_A = I \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_A}; \quad n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_{ш} + R_A}{R_{ш}}; \quad R_{ш} = \frac{R_A}{n-1}.$$

Выведенная для $R_{ш}$ формула позволяет по известному сопротивлению амперметра и заданному коэффициенту расширения пределов измерения подсчитать сопротивление шунта.

Для расширения пределов измерения вольтметра применяют добавочные сопротивления, которые включают последовательно с обмоткой вольтметра (рис. 11.10). Обозначения на рисунке: $R_{доб}$ – добавочное сопротивление; R_V – сопротивление вольтметра; U – измеряемое напряжение; U_V – максимально допустимое напряжение вольтметра; I_V – ток, протекающий через вольтметр; $m = U/U_V$ – коэффициент расширения пределов измерения вольтметром.

В соответствии с рис. 11.10 получим

$$U = I_V(R_V + R_{доб}); \quad U_V = I_V R_V;$$

$$m = \frac{U}{U_V} = \frac{R_V + R_{доб}}{R_V};$$

$$R_{доб} = R_V(m - 1).$$

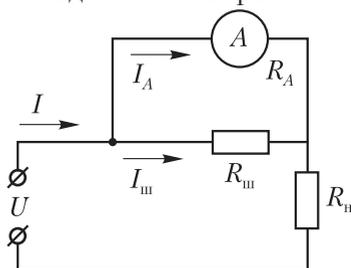


Рис. 11.9

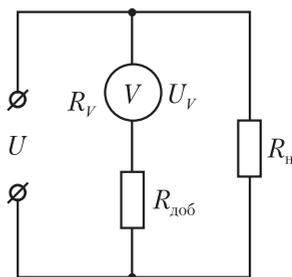


Рис. 11.10

Последняя формула позволяет по заданному коэффициенту расширения пределов измерения и известному сопротивлению вольтметра найти добавочное сопротивление.

Помимо шунтов и добавочных сопротивлений в схемах переменного тока для расширения пределов измерения применяются измерительные трансформаторы, которые одновременно обеспечивают безопасность операторов при измерениях в высоковольтных цепях.

Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в ветвь, где измеряется ток, а вторичная обмотка подсоединяется к зажимам амперметра.

Первичная обмотка трансформатора тока содержит один или несколько витков, вторичная обмотка — большое число витков. Для обеспечения безопасности один конец вто-

ричной обмотки заземлен. Шкала амперметров, включаемых через трансформатор тока, рассчитана на 5 А (реже на 1 А).

Пределы измерений трансформаторами тока расширяются в k раз, где k — коэффициент трансформации.

Трансформатор напряжения изменяет пределы измерения вольтметра также в k раз. Многовитковая первичная обмотка трансформатора напряжения подключается параллельно участку, напряжение на котором измеряется, а вторичная обмотка — к зажимам вольтметра. Число витков вторичной обмотки меньше, чем первичной ($w_2 < w_1$).

Карточка № 11.10 (251)

Расширение пределов измерения приборов непосредственной оценки

Шкала амперметра 0—30 А. Ток в цепи может достигать 300 А. Сопротивление амперметра 0,09 Ом. Каково должно быть сопротивление шунта?	0,1 Ом	167
	0,01 Ом	96
	0,001 Ом	56
Шкала амперметра 0—10 А. Сопротивление амперметра 0,5 Ом. Сопротивление шунта 0,1 Ом. Какой максимальный ток можно измерить?	60 А	46
	50 А	147
	40 А	116
Шкала вольтметра 0—100 В. Напряжение в цепи может достигать 500 В. Сопротивление вольтметра 5000 Ом. Найдите добавочное сопротивление вольтметра.	25 кОм	36
	20 кОм	66
	50 кОм	6
Шкала амперметра 0—5 А. Амперметр подключен к трансформатору тока с коэффициентом трансформации 100. Какой максимальный ток можно измерить?	100 А	200
	500 А	233
	1000 А	189
Можно ли ваттметром электродинамической системы измерить мощность: а) в цепи постоянного тока; б) в цепи переменного тока?	а) Можно; б) можно	210
	а) Можно; б) нельзя	222
	а) Нельзя; б) можно	244

11.11. Измерение мощности в трехфазных цепях

Мощность симметричной трехфазной цепи находят как утроенную мощность одной фазы. Измерение мощности одной фазы осуществляется ваттметром, включенным по схемам рис. 11.1 при соединении нагрузки звездой (рис. 11.11, а) и треугольником (рис. 11.11, б).

Если нулевая точка звезды или ветви треугольника недоступны для непосредственного подключения приборов, то образуют искусственную нулевую точку, как показано на рис. 11.12. При этом необходимо, чтобы каждое из сопротивлений R_V было равно сопротивлению вольтметровой обмотки ваттметра.

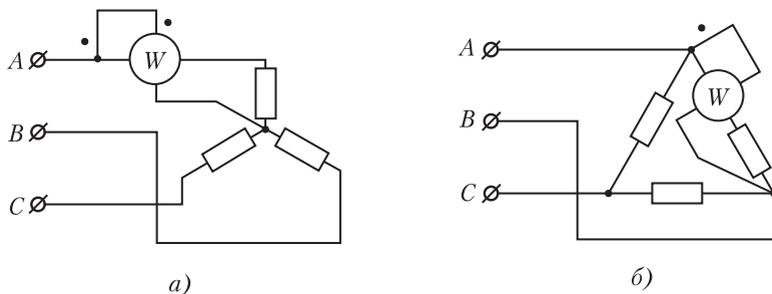


Рис. 11.11

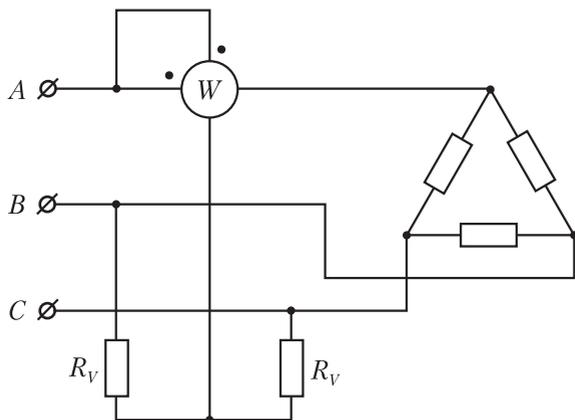


Рис. 11.12

Для измерения мощности несимметричной трехфазной цепи используется метод двух ваттметров.

Для доказательства этого метода выразим мощность трехпроводной трехфазной цепи через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой без нулевого провода сумма линейных токов равна нулю: $i_A + i_B + i_C = 0$, или $i_C = -i_A - i_B$. Подставляя выражение тока i_C в формулу мощности трехфазной цепи:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C,$$

получаем

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C (-i_A - i_B) = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B.$$

При соединении треугольником сумма фазных (линейных) напряжений равна нулю: $u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = 0$ или $u_{AB} = -u_{BC} - u_{CA}$. Подставляя выражение напряжения u_{AB} в формулу мощности:

$$p = u_{AB} i_{AB} + u_{BC} i_{BC} + u_{CA} i_{CA},$$

находим

$$p = u_{BC} (i_{BC} - i_{AB}) + u_{CA} (i_{CA} - i_{AB}) = u_{BC} i_B + u_{CA} (-i_A) = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B.$$

Полученным результатам соответствует схема включения двух ваттметров, показанная на рис. 11.13. Мощность несимметричной трехфазной цепи находят как сумму показаний этих ваттметров. В некоторых случаях (это зависит от характера нагрузки) стрелка одного из ваттметров будет отклоняться влево, за нуль шкалы. Тогда необходимо изменить направление тока в одной из обмоток этого ваттметра и отсчитать его показания. При этом мощность цепи находят как разность показаний ваттметров.

Мощность четырехпроводной трехфазной цепи измеряют тремя ваттметрами (рис. 11.14) и подсчитывают как сумму их показаний.

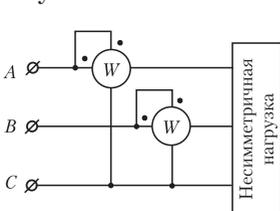


Рис. 11.13

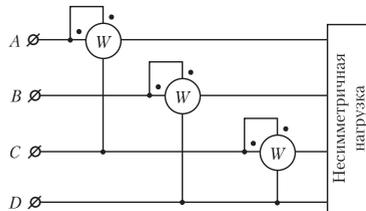


Рис. 11.14

Имеются также специальные ваттметры, в которых два (для трехпроводной цепи) или три (для четырехпроводной цепи) измерительных механизма действуют на одну ось. Эти механизмы расположены в одном корпусе. По шкале ваттметра отсчитывают непосредственно мощность трехфазной цепи.

Карточка 11.11 (287)

Измерение мощности в цепях трехфазного тока

Сколько ваттметров необходимо для измерения мощности трехфазной цепи при симметричной нагрузке?	Один	178
	Два	137
	Три	158
Сколько ваттметров при несимметричной нагрузке нужно для измерения мощности трехфазной цепи: а) с нулевым проводом; б) без нулевого провода?	Два	107
	а) Два; б) три	127
	а) Три; б) два	27
На какие токи и напряжения включают ваттметр при измерении мощности: а) с одним ваттметром; б) с двумя ваттметрами?	а) Фазные; б) фазные	87
	а) Линейные; б) линейные	17
	а) Фазные; б) линейные	77
На какие а) токи и б) напряжения включают ваттметры при измерении мощности в трехфазной цепи с нулевым проводом?	а) Линейные; б) линейные	168
	а) Фазные; б) фазные	97
	а) Линейные; б) фазные	57
Зачем нужна искусственная нулевая точка?	Чтобы измерить линейное напряжение	47
	Чтобы измерить фазное напряжение	148

11.12. Индукционный счетчик электрической энергии. Учет энергии в однофазных и трехфазных цепях

Для подсчета количества электрической энергии, поступившей к потребителю за определенное время, служат элект-

рические счетчики. В цепях переменного тока наибольшее распространение получили индукционные счетчики.

Устройство индукционного счетчика показано на рис. 11.15. Многовитковая обмотка электромагнита 2 (обмотка напряжения) подсоединена параллельно потребителю (нагрузке). Последовательно с нагрузкой включена обмотка электромагнита 1–3, состоящая из нескольких витков (токовая обмотка). Поскольку индуктивность катушки пропорциональна квадрату числа витков, можно считать, что индуктивность обмотки напряжения значительно больше индуктивности токовой обмотки. Поэтому ток и совпадающий с ним по фазе магнитный поток электромагнита 2 отстают по фазе от тока и магнитного потока электромагнита 1–3 на угол, близкий к 90° (рис. 11.16).

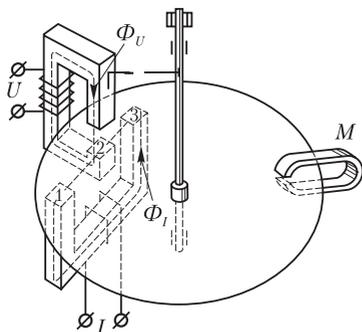


Рис. 11.15

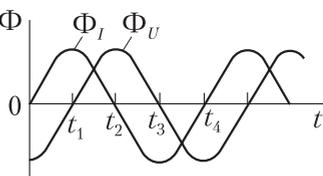


Рис. 11.16

Рассмотрим, как изменяются во времени магнитные потоки на участках 1–2–3 (рис. 11.17). Магнитный поток, входящий в диск сверху, пометим буквой *N*, а снизу — буквой *S*. В момент времени $t = 0$ магнитный поток Φ_I равен нулю, а магнитный поток Φ_U отрицателен (рис. 11.16), поэтому участки 1 и 3 (рис. 11.17) помечаем цифрой 0, а участок 2 — буквой *S*. В момент времени t_1 магнитный поток Φ_I положителен, а поток $\Phi_U = 0$, поэтому

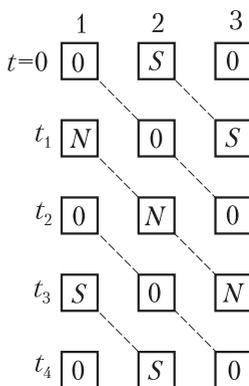


Рис. 11.17

участок 1 помечаем буквой N , участок 2 — цифрой 0, а участок 3 — буквой S . Проведя аналогичные рассуждения для последовательных значений времени t_2 , t_3 , t_4 , проставим буквы на рис. 11.17. Из рис. 11.17 очевидно, что северный полюс магнитного поля последовательно смещается от участка 1 к участкам 2 и 3, также последовательно пробегает эти участки нулевого значения поля, а затем его южный полюс.

Рассмотренное магнитное поле, образованное наложением магнитных полей двух электромагнитов, называется бегущим. Бегущее магнитное поле индуцирует в диске токи, которые, взаимодействуя с полем, создают механическую силу. Сила в соответствии с правилом Ленца стремится устранить причину, ее вызывающую. Она раскручивает диск в направлении бегущего поля. Теоретические выкладки показывают, что при определенных условиях вращающий момент пропорционален мощности:

$$M_{вр} = k_1 UI \cos \varphi = k_1 P.$$

Тормозной момент, создаваемый вихревыми токами, которые индуцируются в диске постоянным магнитом M (см. рис. 11.15), пропорционален скорости вращения диска n :

$$M_{т} = k_2 n.$$

В установившемся режиме $M_{вр} = M_{т}$, откуда

$$k_1 P = k_2 n.$$

Следовательно,

$$P = kn,$$

где $k = k_2 / k_1$.

Умножим левую и правую части последнего равенства на время t :

$$Pt = knt.$$

Здесь $Pt = A$ — потребляемая энергия; $nt = N$ — суммарное число оборотов диска за время t .

Таким образом,

$$A = kN,$$

т.е. потребляемая энергия пропорциональна числу оборотов диска, и шкалу счетного механизма можно градуировать в единицах энергии (кВт · ч).

Принципиальная схема включения счетчика в однофазную цепь не отличается от схемы включения ваттметра (рис. 11.18). Практическая схема включения однофазного счетчика представлена на рис. 11.19.

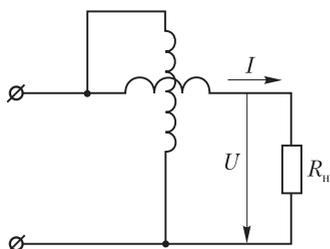


Рис. 11.18

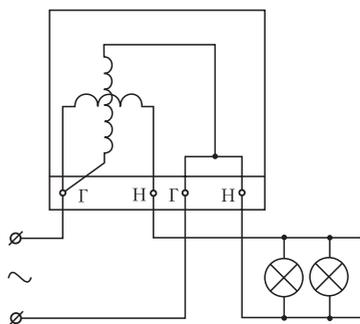


Рис. 11.19

Схемы включения индукционных счетчиков для измерения энергии в цепях трехфазного тока аналогичны рассмотренным схемам включения ваттметров. В большинстве случаев для учета энергии в трехфазных цепях пользуются трехфазными счетчиками.

В трехпроводных трехфазных цепях используются счетчики с двумя измерительными механизмами, размещенными в одном корпусе и связанными общей осью. В счетчиках для измерения энергии в четырехпроводных трехфазных цепях с общей осью связаны три измерительных механизма.

Ваттметры и счетчики обычно служат для измерения активной мощности и энергии. Включенные по специальным схемам, они используются для измерения реактивной мощности и энергии. Выпускаются также специальные реактивные ваттметры и счетчики.

Карточка № 11.12 (238)

Индукционный счетчик электрической энергии.

Учет энергии в однофазных и трехфазных цепях

Как соотносятся по фазе магнитные потоки обмотки напряжения и токовой обмотки индукционного счетчика электрической энергии?	Совпадают по фазе	117
	Сдвинуты по фазе на угол, близкий к 90°	37
Чему пропорциональны: а) вращающий; б) тормозной моменты, действующие на диск счетчика?	а) Мощности; б) углу поворота диска	67
	а) Мощности; б) скорости вращения диска	7
	а) Энергии; б) скорости вращения диска	201
Скорость вращения диска счетчика увеличилась в 2 раза. Как изменилась мощность, потребляемая нагрузкой из сети?	Не изменилась	234
	Увеличилась в 2 раза	190
	Сделать выводы относительно мощности нельзя, так как счетчик измеряет энергию	211
Чему пропорциональны: а) мощность; б) энергия, потребляемые нагрузкой из сети?	а) Скорости вращения диска счетчика; б) то же	223
	а) Скорости вращения диска; б) числу оборотов диска	245
	а) Числу оборотов диска; б) то же	179
Сколько зажимов необходимо для включения однофазного счетчика в сеть?	2	138
	4	159
	6	108

11.13. Измерение сопротивлений

Неизвестное сопротивление R_x можно найти, используя закон Ома, если известны ток I , протекающий через сопротивление, и напряжение U на его зажимах:

$$R_x = U / I.$$

На рис. 11.20 изображена схема для измерения сопротивлений с использованием закона Ома.

Сопротивление $R_{\text{изм}}$, подсчитанное по показаниям приборов, будет несколько отличаться от действительного R_x :

$$R_{\text{изм}} = \frac{U + IR_A}{I} = R_x + R_A.$$

Из этого выражения очевидно, что схема рис. 11.20 пригодна для измерения больших сопротивлений, когда $R_x \gg R_A$.

Для измерения малых сопротивлений измерительные приборы необходимо включать по схеме рис. 11.21. В этом случае

$$R_{\text{изм}} = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{\frac{U}{R_x} + \frac{U}{R_V}} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_V}}.$$

Из формулы очевидно, что измерение будет тем точнее, чем сильнее неравенство $R_x \ll R_V$.

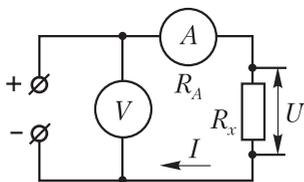


Рис. 11.20

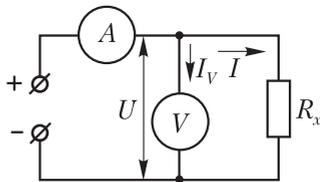


Рис. 11.21

Широкое применение для измерения сопротивлений находят специальные приборы — омметры. Принципиальная схема омметра изображена на рис. 11.22. Обозначения на рисунке: E — батарея гальванических элементов; И — измеритель тока магнитоэлектрической системы; $R_{\text{огр}}$ — ограничительное сопротивление. Сопротивление R_x включается между клеммами a — b . При измерениях ключ K разомкнут.

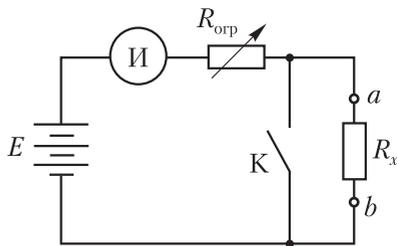


Рис. 11.22

На основании закона Ома можно написать

$$I = \frac{E}{R_{\text{орг}} + R_x} .$$

При постоянных значениях E и $R_{\text{орг}}$ ток в цепи I зависит только от сопротивления R_x , поэтому измеритель тока может быть отградуирован непосредственно в единицах сопротивления — омах. Шкала прибора обратная: нулевое деление расположено справа; по мере увеличения сопротивления R_x и уменьшения тока I стрелка прибора отклоняется влево. Сопротивление $R_{\text{орг}}$ служит для предохранения измерителя от перегрузок и для установки омметра на нуль. Перед измерением следует замкнуть ключ K (установить $R_x = 0$) и, регулируя $R_{\text{орг}}$ ручкой, выведенной на переднюю панель прибора, установить стрелку измерителя на нуль. Затем ключ K следует разомкнуть. Если в схеме прибора ключ K не предусмотрен, то при установке измерителя на нуль зажимы $a - b$ нужно замкнуть накоротко толстым проводом.

Разновидностью омметров являются мегомметры. Они предназначены для измерения больших сопротивлений, например сопротивлений изоляции проводов. Вместо гальванической батареи в них устанавливается динамомашина с ручным приводом, вырабатывающая напряжение 500 В при скорости вращения ручки около 90 об/мин. Внешний вид мегомметра показан на рис. 11.23.

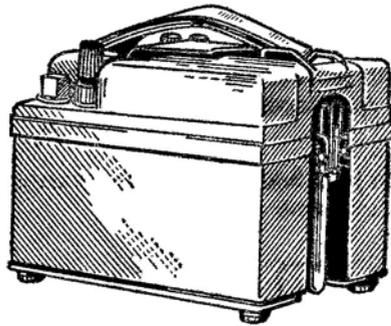


Рис. 11.23

Характер повреждения обесточенной электрической сети можно выявить, проверив отдельные линии сети с помощью мегомметра. Если провод оборван, то мегомметр покажет очень большое сопротивление изоляции (порядка $10^6 - 10^7$ Ом). При коротком замыкании линии показания мегомметра будут близки к нулю. В нормальной линии мегомметр покажет сопротивление нагрузки.

Качество изоляции характеризуется ее электрическим сопротивлением и электрической прочностью. Для измерения сопротивления изоляции сети применяют мегомметры с

высоким напряжением (порядка 500 В и выше), что позволяет не только измерить сопротивление изоляции, но одновременно проверить ее электрическую прочность.

Перед проверкой изоляции сети какого-либо объекта (например, корабля) необходимо полностью обесточить сеть, выключить генераторы, аккумуляторы и отключить провода и штепсельные разъемы от всех потребителей электроэнергии так, чтобы электрическая сеть была полностью изолирована от корпуса. Конденсаторы также надо отключить от сети во избежание пробоя их высоким напряжением мегомметра.

Сопротивление изоляции всей сети относительно корпуса корабля в значительной степени зависит от условий эксплуатации и влияния внешней среды (влажность, загрязнение, температура, срок службы). При всех условиях это сопротивление, измеренное мегомметром, не должно быть ниже $3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$.

Карточка № 11.13 (322) Измерение сопротивлений

На рис. 11.20 вольтметр показывает 1 В, амперметр 0,1 А. Сопротивление амперметра 0,1 Ом. Определите сопротивление R_x .	10 Ом	128
	10,1 Ом	28
	9,9 Ом	88
Для измерения каких сопротивлений целесообразно применять схему, изображенную выше?	Больших сопротивлений	18
	Малых сопротивлений	78
	Сопротивлений, значительно превышающих внутреннее сопротивление амперметра	169
На рис. 11.21 для измерения каких сопротивлений целесообразно применять схему (см. рис 11.21)?	Малых сопротивлений	98
	Сопротивлений, значительно превышающих внутреннее сопротивление амперметра	58
	Сопротивлений, которые значительно меньше внутреннего сопротивления вольтметра	48

Почему шкала омметра градуируется справа налево (нуль шкалы расположен справа)?	Потому что при увеличении сопротивления уменьшается ток в цепи и стрелка измерителя движется влево	149
	Потому что это удобно при установке стрелки омметра на нуль	118
Для чего предназначен в омметре ключ, закорачивающий зажимы, к которым подключается измеряемое сопротивление?	Для градуировки прибора	38
	Для установки стрелки на нуль перед началом измерений	68

11.14. Измерение сопротивлений с помощью моста постоянного тока

Для точных измерений сопротивлений в лабораторных условиях широкое применение находят мосты постоянного тока. Мостовая схема изображена на рис. 11.24. Сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 называются плечами моста, а ветви, включенные между точками ab и cd , — диагоналями. В диагональ ab включен источник питания с постоянным напряжением U , в диагональ cd — измерительный прибор (обычно гальванометр магнитоэлектрической системы).

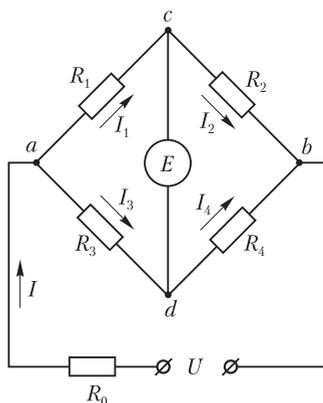


Рис. 11.24

Мост называется уравновешенным, если потенциалы точек c и d равны между собой при подключенном источнике питания. Равновесие моста определяется по гальванометру: при $\varphi_c = \varphi_d$ ток в измерительной диагонали отсутствует и стрелка гальванометра стоит на нуле.

Для уравновешенного моста справедливы следующие соотношения:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3; \quad I_2 R_2 = I_4 R_4;$$

$$I_1 = I_2; \quad I_3 = I_4.$$

Разделив почленно первое уравнение на второе, получим

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_4 R_4}, \text{ или } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Таким образом, в уравновешенном мосте произведения сопротивлений противоположных плеч равны между собой: $R_1 R_4 = R_2 R_3$.

Если плечи R_1, R_2, R_3 образованы магазинами сопротивлений, а плечо $R_4 = R_x$ — неизвестным измеряемым сопротивлением, то, получив равновесие моста за счет изменения R_1, R_2 или R_3 и отсчитав эти сопротивления, неизвестное сопротивление подсчитывают по формуле

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}.$$

Уравновешенный мост позволяет измерить сопротивление с большой точностью.

Карточка № 11.14 (202)

Измерение сопротивлений с помощью моста постоянного тока

При каком условии потенциалы точек, к которым подсоединен гальванометр, будут одинаковыми?	$I_1 R_1 = I_2 R_2$	8
	$I_1 R_1 = I_3 R_3$	202
При каком условии ток гальванометра равен нулю?	$I_1 = I_3$	191
	$I_1 = I_2$	212
	$I_1 = I_4$	224
Как изменится ток в измерительной диагонали уравновешенного моста, если напряжение питания уменьшится?	Уменьшится	246
	Увеличится	180
	Останется равным нулю	139

Продолжение карт. № 11.14

$R_1 = 10R_3$. Мост оказался уравновешенным при $R_2 = 10$ Ом. Определите R_4 .	1 Ом	160
	10 Ом	109
	100 Ом	129
Укажите основное достоинство уравновешенного измерительного моста.	Малое потребление энергии вследствие отсутствия тока в измерительной диагонали	29
	Большая точность измерений	89
	Возможность градуировать измеритель непосредственно в единицах измеряемой величины	19

11.15. Магнитоэлектрический осциллограф

Осциллографы предназначены для исследования быстропротекающих процессов.

Рассмотрим устройство и принцип действия магнитоэлектрического осциллографа, с помощью которого осуществляется запись процессов на фотопленку.

Конструктивно магнитоэлектрические осциллографы выполняются различным образом, но в любом из них можно выделить следующие основные узлы: измерительный элемент (вибратор), светооптическое устройство, устройство для фотографирования и наблюдения исследуемых процессов.

Вибратор представляет собой магнитоэлектрический измеритель тока. Его работа основана на взаимодействии контура с током (шлейфа) и магнитного поля постоянного магнита.

Конструкция магнитоэлектрического вибратора показана на рис. 11.25. В воздушном зазоре подковообразного магнита 1 расположена петля 2, которая опирается на изолирующие призмы 3. Натяжение

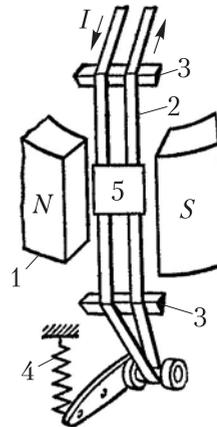


Рис. 11.25

петли осуществляется пружиной 4. К средней части петли приклеено зеркальце 5.

При прохождении по петле измеряемого тока возникает вращающий момент. Противодействующий момент при малых углах закручивания петли пропорционален углу поворота зеркальца. Для получения оптимального демпфирующего момента вибратор помещают в герметический корпус и заливают жидкостью требуемой вязкости.

Для измерения угла отклонения зеркальца вибратора служит светооптическое устройство, принципиальная схема которого изображена на рис. 11.26. Свет лампы 1 через конденсор 2 и диафрагму 3 с помощью призмы 4 узким пучком отбрасывается на зеркальце вибратора 5. Отраженный от зеркальца пучок лучей призмой 8 делится на две части. Одна часть пучка с помощью зеркального барабана 9 направляется на матовый экран 10 для визуального наблюдения, другая часть фокусируется цилиндрической линзой 6 на поверхность фотопленки или фотобумаги, намотанной на барабан 7.

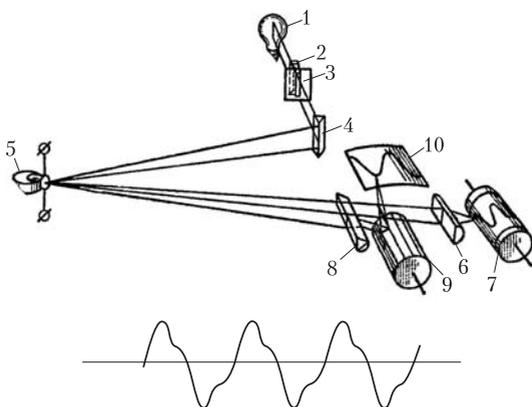


Рис. 11.26

Вследствие значительной длины отраженного луча небольшие колебания зеркальца вибратора вызывают значительные перемещения конца луча на матовом экране и на поверхности светочувствительного материала.

Зеркальный барабан и матовый экран позволяют получить неподвижный светящийся график исследуемого периодического процесса. Кроме того, как периодический, так и непериодический процессы могут быть записаны в виде осциллограммы на светочувствительном материале.

Зеркальный барабан 9 и барабан 7 приводятся от специального электродвигателя. Изменяя скорость электродвигателя, можно менять масштаб времени на осциллограмме.

Карточка № 11.15 (312)

Магнитоэлектрический осциллограф

Будет ли работать осциллограф, если в измерительном элементе постоянный магнит заменить электромагнитом?	Будет	79
	Не будет	170
Как изменится отклонение светового пятна на экране, если увеличить длину светового луча от лампы до экрана?	Увеличится	99
	Не изменится	59
	Уменьшится	49
Можно ли наблюдать на экране осциллографа: а) непериодический процесс; б) периодический процесс?	Можно	150
	Нельзя	119
	а) Нельзя; б) можно	39
Через шлейф вибратора пропустили ток 3 А. При этом луч на экране отклонился на 3 см. Найдите масштаб тока.	3 А/см	69
	0,1 А/см	9
	1 А/см	203
Масштаб времени $m_t = 0,01$ с/мм. При наблюдении синусоидального тока на экране осциллографа измерено расстояние между соседними амплитудами $l = 2$ мм. Найдите частоту тока.	100 Гц	236
	50 Гц	192
	200 Гц	213

11.16. Электронный осциллограф

Электронный осциллограф предназначен для визуального наблюдения и исследования процессов в электрических цепях. Индикатором осциллографа является экран электроннолучевой трубки.

Трубка представляет собой стеклянную колбу (рис. 11.27), из которой выкачан воздух. На экране трубки изнутри нанесен светочувствительный слой, способный светиться под воздействием пучка электронов. Внутри трубки размещены

электроды, предназначенные для создания электронного пучка и управления им.

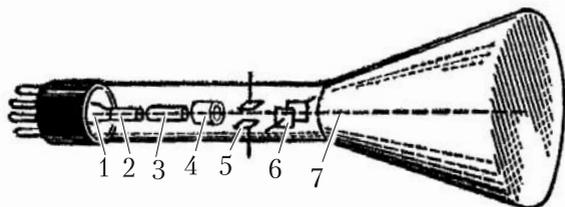


Рис. 11.27

Из подогревного катода *1* эмитируются электроны. Изменяя отрицательный потенциал управляющего электрода *2*, можно менять плотность электронного пучка и яркость изображения на экране. Под воздействием положительного потенциала анодов *3* и *4* электроны разгоняются по направлению к передней стенке трубки. С помощью управляющего электрода *2* формируется узкий пучок электронов *7*, который проходит между вертикальными и горизонтальными отклоняющими пластинами *5* и *6*. Аноды имеют специальную форму и образуют электростатическую линзу, фокусирующую электронный пучок на экране трубки. Изменяя потенциал анода, можно менять фокусировку пучка.

Под воздействием напряжения, подводимого к отклоняющим пластинам, электронный пучок отклоняется, а светящаяся точка на экране перемещается.

Физическую величину, характеризующую исследуемый процесс, нужно преобразовать в напряжение и подвести его к пластинам *5*. Для наблюдения изменения во времени исследуемой величины на пластины *6* необходимо подать напряжение временной развертки, пропорциональное времени. По окончании времени развертки $t_{\text{пр}}$ это напряжение очень быстро снижается до нуля и затем снова растет до максимального значения, пропорционального времени.

На рис. 11.28 представлен график напряжения, удовлетворяющего указанным условиям: $t_{\text{пр}}$ — время прямого хода луча; $t_{\text{обр}}$ — время обратного хода луча; T_r — период горизонтальной развертки. Такое пилообразное напряжение

вырабатывается специальным генератором, расположенным в корпусе осциллографа.

Кроме того, на отклоняющие пластины подается постоянное напряжение смещения. Изменяя это напряжение, можно менять начальное положение светящейся точки на экране (начало координат). Регулирование напряжения смещения осуществляется с помощью ручек «Ось X вверх, вниз» и «Ось Y влево, вправо».

Изменяя частоту пилообразного напряжения, можно получить неподвижное изображение на экране, если исследуется периодический процесс. Для исследования непериодических процессов изготавливаются осциллографы, трубка которых обладает значительным послесвечением.

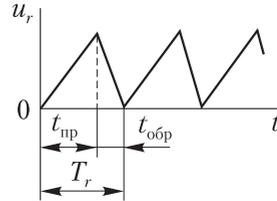


Рис. 11.28

Карточка № 11.16 (216) Электронный осциллограф

Как изменяется яркость изображения на экране при уменьшении отрицательного потенциала управляющего электрода?	Увеличивается	225
	Уменьшается	247
	Не изменяется	181
К отклоняющим пластинам подведено постоянное напряжение: «+» к нижней пластине, «-» к верхней пластине. Куда переместится светящаяся точка на экране?	Вверх	140
	Вниз	161
К отклоняющим пластинам подведено постоянное напряжение; «+» к правой пластине, «-» к левой пластине. Куда переместится светящаяся точка на экране?	Влево	110
	Вправо	130
Как изменится изображение на экране при увеличении амплитуды пилообразного напряжения?	Яркость изображения на экране увеличится	30
	Высота изображения на экране увеличится	90
	Ширина изображения на экране увеличится	20

Продолжение карт. № 11.16

Можно ли с помощью электронного осциллографа исследовать непериодические процессы?	Можно, если трубка обла- дает послесвечением	80
	Можно, если повысить яркость изображения	171
	Нельзя	100

11.17. Электрические измерения неэлектрических величин

Электрические измерения обладают рядом существенных достоинств, таких, как простота автоматизации процесса измерения, возможность передачи показаний приборов на дальние расстояния, возможность математической обработки результатов измерений с помощью электронных вычислительных машин и др. Поэтому так быстро развивается техника электрических измерений различных неэлектрических величин: линейных и угловых перемещений, температуры, давления, концентрации растворов и т.д.

Чтобы измерить неэлектрическую величину с помощью электрического измерительного прибора, необходимо установить однозначную зависимость между измеряемой неэлектрической величиной и некоторой электрической величиной. Устройство, предназначенное для реализации такой зависимости, называется датчиком. В этом случае измерительный прибор может быть отградуирован непосредственно в единицах измеряемой неэлектрической величины.

Рассмотрим некоторые типы датчиков, получивших широкое применение в измерительной технике.

На рис. 11.29 изображено устройство потенциометрического датчика, который может служить для измерения линейных и угловых перемещений. Связав движок потенциометра с поплавком, можно измерять высоту уровня, а следовательно, и количество топлива в баке.

Напряжение U на входе поддерживается постоянным ($U = \text{const}$). При этом условии напряжение на выходе зависит только от высоты уровня h : $U_h = f(h)$.

Магнитоэлектрический вольтметр, измеряющий напряжение U_h , может быть отградуирован непосредственно в единицах высоты уровня или объема бака.

На рис. 11.30 изображено устройство тензометрического датчика, применяемого для измерения деформации различных деталей (в частности, на самолетах). Константановая проволочка диаметром 20–30 мкм наклеивается на тонкую бумагу, которая в свою очередь приклеивается к исследуемой детали. Деформации детали передаются проволочке. Сопротивление проволочки изменяется. Измеряя изменение сопротивления проволочки, можно судить о величине деформации детали.

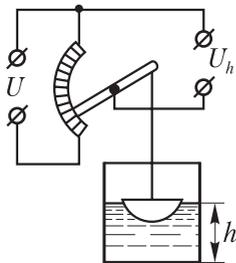


Рис. 11.29

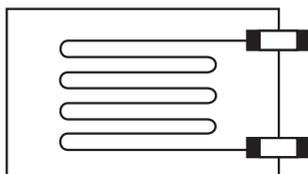


Рис. 11.30

В цепях переменного тока широко используются индуктивные и емкостные датчики.

Устройство индуктивного датчика показано на рис. 11.31. На магнитопровод с переменным воздушным зазором намотана катушка. Такое устройство обеспечивает функциональную зависимость индуктивности L от воздушного зазора δ : $L = f(\delta)$, т.е. связывает изменения электрической величины L с изменением неэлектрической величины δ .

На рис. 11.32 изображено устройство емкостного датчика. В бак с топливом помещен цилиндрический конденсатор, между пластинами которого свободно проникает топливо. Емкость конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости вещества, изолирующего одну пластину от другой. Диэлектрическая проницаемость воздуха ϵ_0 и топлива ϵ_t значительно отличаются друг от друга, поэтому при изменениях уровня h изменяется емкость C : $C = f(h)$.

Измеритель электрической емкости может быть отградуирован непосредственно в единицах количества топлива.

Преимущества системы, изображенной на рис. 11.32, перед системой, изображенной на рис. 11.29, очевидны. Емкостный датчик не имеет подвижных деталей, конструктивно прост и надежен в эксплуатации.

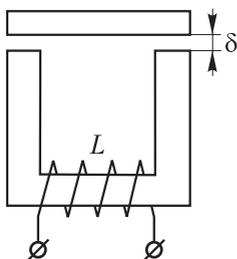


Рис. 11.31

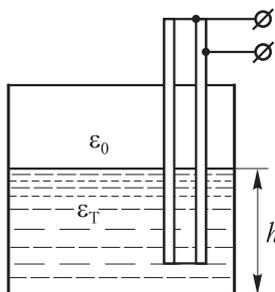


Рис. 11.32

Для измерения температуры широко применяются резисторы, изготовленные из материалов (обычно полупроводников), сопротивление которых сильно зависит от температуры.

Для измерения давления часто используют столбики, набранные из угольных шайб, или угольный порошок. Например, в угольном микрофоне изменение давления воздуха, вызванное звуковыми колебаниями, преобразуется в изменение электрического сопротивления угольного порошка, расположенного под мембраной: при сжатии порошка его сопротивление уменьшается, при расширении — увеличивается.

Широкое применение находят ионизационные датчики, основанные на принципе изменения электрических свойств газовой среды под воздействием радиоактивного излучения.

Рассмотренные приборы относятся к типу параметрических датчиков. В них под действием неэлектрической величины изменяется какой-либо из электрических параметров датчика.

Кроме того, в измерительной технике и автоматике широко применяются так называемые генераторные датчики, в которых изменение неэлектрической величины вызывает появление ЭДС. К генераторным датчикам относятся ин-

дукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические преобразователи и другие приборы.

Карточка № 11.17 (202)

Электрические измерения неэлектрических величин

Что называется датчиком?	Устройство для измерения неэлектрической величины	60
	Устройство для измерения электрической величины	50
	Устройство, преобразующее изменения неэлектрической величины в изменения электрической величины	151
Можно ли в качестве датчика использовать потенциометр, который питается произвольно изменяющимся напряжением?	Можно	120
	Нельзя	40
Проволочка тензометрического датчика наклеена параллельно оси стержня. Как изменится сопротивление датчика при сжатии стержня?	Увеличится	70
	Не изменится	10
	Уменьшится	237
Как изменится индуктивность дросселя, если увеличить воздушный зазор между якорем и сердечником?	Увеличится	193
	Не изменится	214
	Уменьшится	226
Как изменится емкость конденсатора, если увеличить диэлектрическую проницаемость вещества, разделяющего его пластины?	Увеличится	248
	Не изменится	182
	Уменьшится	141

ГЛАВА 12

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 ВОЛЬТ

12.1. Назначение и классификация электрических сетей. Требования, предъявляемые к электрическим сетям

Электрическая энергия играет роль универсальной энергии, которая удобна для дальних передач, легко дробится по отдельным потребителям и при помощи сравнительно несложных устройств преобразуется в нужные виды энергии.

Эти задачи решаются в электроэнергетической системе, где осуществляется преобразование энергии топлива или падающей воды в электрическую энергию, трансформация величины токов и напряжений, распределение и передача электрической энергии к потребителям.

Часть энергетической системы, включающую трансформаторные подстанции (ТП) и линии электропередачи (ЛЭП), называют электрической сетью.

Таким образом, электрическая сеть служит для передачи электрической энергии от мест ее производства к местам потребления и для распределения электрической энергии по группам потребителей и отдельным потребителям.

Классификация электрических сетей осуществляется по различным признакам.

В зависимости от величины напряжения между проводами линии различают сети напряжением до 1000 В и сети напряжением свыше 1000 В.

По роду тока электрические сети делят на сети постоянного тока, сети однофазного тока и сети трехфазного тока.

В зависимости от конструктивных особенностей различают воздушные сети, кабельные сети и внутренние сети зданий и объектов.

Основные требования, которые предъявляются к электрическим сетям, используемым в сельском хозяйстве, сводятся к экономии электротехнических материалов и снижению первоначальных затрат при гарантированной надежности электросети и высоком качестве электроэнергии.

Для удовлетворения этих требований разработан ряд мероприятий, в частности применение повышенных напряжений, стальных проводов, регулирование напряжения.

В настоящее время сети трехфазного тока напряжением 220/127 В вытесняются сетями с напряжением 380/220 В, вместо сетей с напряжением 6 кВ применяются сети 10 кВ и т.д.

При расчете электрических сетей существенное внимание должно быть уделено обеспечению безопасности обслуживающего персонала.

Карточка № 12.1 (112)

Назначение и классификация электрических сетей. Требования, предъявляемые к электрическим сетям

Какие задачи решаются при помощи электрической сети?	Производство электроэнергии	184
	Передача электроэнергии	26
	Потребление электроэнергии	218
	Все перечисленные выше задачи	58
Какие сети используются для передачи электроэнергии?	Сети напряжением до 1000 В	187
	Сети напряжением свыше 1000 В	91
	Оба названных вида сетей	221
Какие сети не используются для передачи электроэнергии?	Сети постоянного тока	212
	Сети однофазного тока	192
	Сети трехфазного тока	20
	Сети многофазного тока	227
Какие сети используются для передачи электроэнергии?	Воздушные сети	52
	Кабельные сети	199
	Внутренние сети объектов	87
	Все перечисленные выше сети	233

Продолжение карт. № 12.1

При равной длине и одинаковой передаваемой мощности какая сеть требует меньшего расхода металла на проводе?	Сеть напряжением 220/127 В	116
	Сеть напряжением 380/220 В	205
	Расход металла на провода в названных выше сетях одинаков	7

12.2. Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 вольт

Для прокладки воздушных линий используются различные виды голых проводов.

Стальные однопроволочные провода изготавливаются с диаметром не более 5 мм. В очень редких случаях применяются медные однопроволочные провода (в районах повышенной влажности, химически загрязненной атмосферы).

Наибольшее применение находят многопроволочные провода, которые имеют высокую прочность и гибкость. Эти провода изготавливаются из одинаковых проволок, количество которых может достигать 37. Диаметр проволок и их число подбирают таким образом, чтобы обеспечить наибольшую плотность упаковки проволок в проводе. Обычно 6, 11, 18 проволок располагаются вокруг одной центральной и слабо закручиваются. В качестве примера на рис. 12.1 представлено поперечное сечение провода ПС-35.

Многопроволочные провода изготавливают стальными, алюминиевыми, сталеалюминиевыми и из биметаллических проволок. Чтобы предохранить стальные провода от ржавчины, их делают из оцинкованной проволоки. Иногда применяют нержавеющую сталь.

В сталеалюминиевых проводах часть проволок — стальные, часть — алюминиевые. Этим обеспечивается механическая прочность при повышенной электропроводности.

Биметаллические проволоки изготавливаются электролитическим способом: стальная жила покрывается слоем меди или алюминия.

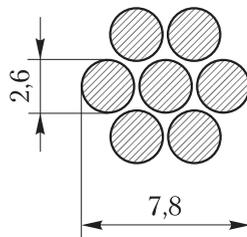


Рис. 12.1

Рассмотрим маркировку голых проводов для воздушных линий.

Медные провода обозначают буквой М, алюминиевые — буквой А, сталеалюминиевые — буквами АС, стальные — буквами ПС.

Однопроволочные провода обозначают буквой О. Цифры, следующие за буквами, указывают диаметр провода в мм² (у однопроволочных проводов) или площадь поперечного сечения в мм² (у многопроволочных проводов). Например, ПС-05 расшифровывается так: провод стальной однопроволочный диаметром 5 мм; ПС-35 — провод стальной многопроволочный с площадью поперечного сечения 35 мм²; А-25 — алюминиевый многопроволочный провод с площадью поперечного сечения 25 мм² и т.д.

Например, вне помещений при температуре нагрева провода 70 °С и температуре окружающего воздуха +25 °С для провода А-16 допускается нагрузка током 105 А, для провода ПС-04 — 30 А и т.д.

Для сравнительной характеристики голых проводов различных типов приведем еще некоторые выборочные данные:

Марка провода	М-25	А-25	АС-25
Активное сопротивление, Ом/км.....	0,74	1,28	1,38
Масса провода, кг/км.....	221	68	92

Из приведенных данных очевидно, что при равных площадях поперечного сечения алюминиевый и сталеалюминиевый провода имеют близкие по величине активные сопротивления. Активное сопротивление медного провода примерно в 1,5 раза меньше. Напомним, что медь является дорогостоящим стратегическим материалом и в сельских электрических сетях практически не применяется.

Для электропроводки внутри помещений, как правило, применяют изолированные провода из меди или алюминия. Изолированные однопроволочные провода имеют большую жесткость и изготавливаются только с площадью поперечного сечения не свыше 10 мм².

Многопроволочные провода изготавливаются из луженых медных или алюминиевых жил. Они удобны при монтаже и эксплуатации.

Для прокладки скрытых безопорных линий, а также для канализации электроэнергии, подводимой к подвижным объектам, применяют электрические кабели. В кабеле

провода двух или трехпроводной (трехфазной) линии заключены в прочную герметическую многослойную оболочку. Кабели могут прокладываться под землей и под водой. Применение кабелей повышает надежность линий электропередачи и уменьшает их опасность для людей и животных. Подземные кабели — основное средство канализации электроэнергии в крупных городах. Недостаток кабельных линий — их высокая стоимость.

В качестве электроизоляционных материалов используются вулканизированная резина, хлопчатобумажная пряжа, пропитанная специальными составами, промасленная бумага, широкое распространение получили поливинилхлоридные оболочки.

Карточка 12.2 (270)

Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 В

В каких проводах высокая прочность совмещается с высокой электропроводностью?	В стальных	239
	В алюминиевых	45
	В сталеалюминиевых	121
Укажите площадь поперечного сечения: а) однопроводного стального провода ПС-04; б) многопроводного сталеалюминиевого провода АС-50.	а) 4 мм ² ; б) 50 мм ²	82
	а) 4 π мм ² ; б) 50 мм ²	154
	а) 4 π мм ² ; б) 6,25 π см ²	111
	а) 4 мм ² ; б) 6,25 π см ²	127
Какой из проводов — А-25 или АС-25 прочнее?	А-25	1
	АС-25	158
	Площади поперечного сечения и прочность этих проводов одинаковы	41
Какую линию целесообразно использовать для подвода электроэнергии к электрокомбайну?	Воздушную линию из голых проводов	134
	Линию из изолированных проводов	75
	Кабельную линию	165
Укажите материал, который не используется для изоляции проводов и кабелей.	Хлопчатобумажная пряжа	106
	Вулканизированная резина	141
	Поливинилхлорид	100
	Слюда	172

12.3. Общие указания о расчете сетей, способы изображения сетей на графиках

Расчет электрических сетей производится на основании исходных данных и нормативов ГОСТа, определяющего типовые элементы сети и их характеристики.

К исходным данным относятся напряжение источника, напряжение и мощность потребителей, вид линии (однофазная, трехфазная, воздушная, кабельная), ее конфигурация (распределение потребителей вдоль линии, схема соединений), длина проводов (расстояние между источником электроэнергии и потребителями), наконец, условия окружающей среды и требования эксплуатации (техники безопасности).

В результате электрического расчета необходимо:

- определить площади поперечного сечения всех проводов так, чтобы потеря напряжения в них и температура нагрева проводов не превышали допустимых норм; выбрать тип и стандартные сечения проводов;

- определить требуемые характеристики плавких вставок и выбрать соответствующие предохранители;

- выбрать схему заземления, определить количество и размеры заземлителей.

При расчете электрических сетей обычно используют так называемые однолинейные схемы. Многолинейная и соответствующая ей однолинейная схема электрической цепи представлены на рис. 12.2.

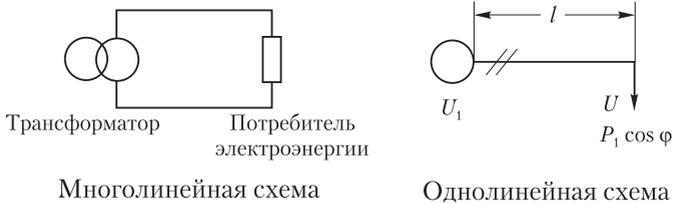


Рис.12.2

На однолинейной схеме указываются: напряжение источника U_1 (напряжение в начале линии), напряжение потребителя U (напряжение в конце линии), мощность P и коэффициент мощности $\cos \varphi$ потребителя, длина линии l . Количество проводов в линии определяется по количеству точек, поставленных у ис-

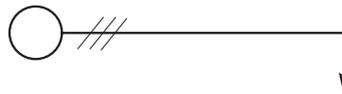
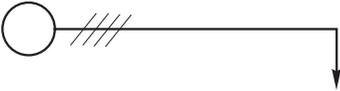


Рис. 12.3

точника. В качестве примера на рис. 12.3 изображена однолинейная схема трехпроводной линии.

Карточка № 12.3 (327)

Общие указания о расчете сетей. Способы изображения сетей на графиках

Каким расчетом определяется пригодность линии к эксплуатации?	Электрическим	35
	Механическим	148
	Экономическим	69
	Всеми названными выше расчетами	178
Какую мощность потребителей надо знать, чтобы произвести расчет сети?	Активную P	94
	Реактивную Q	13
	Полную S	63
Какую форму записи напряжения источника целесообразно использовать при расчете сети?	$U_1 = 220 \sin \omega t$, В	243
	$\dot{U}_1 = 220 e^{j\omega t}$, В	29
	$U_1 = 220$ В	185
Какие из приведенных данных не определяются в результате электрического расчета воздушной линии?	Площади поперечного сечения проводов	27
	Номинальные токи предохранителей	219
	Количество и размеры заземлителей	59
	Количество и размеры опор	188
 <p>Какая линия изображена?</p>	Однопроводная	92
	Двухпроводная	222
	Четырехпроводная	213

12.4. Падение и потеря напряжения в линиях постоянного и переменного тока

При прохождении электрического тока по проводам линии возникает падение напряжения, пропорциональное величине тока и сопротивлению линии. Следовательно, напряжение на зажимах потребителя U всегда меньше, чем напряжение на зажимах источника U_1 .

В цепях постоянного тока разность

$$\Delta U = U_1 - U$$

называют потерей напряжения.

Потерю напряжения часто выражают в процентах от номинального значения напряжения потребителя:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100.$$

При заданном напряжении источника потерей напряжения определяется напряжение на зажимах потребителя, поэтому величина потери напряжения строго регламентируется. В линиях, по которым осуществляется питание силовой (электродвигатели) нагрузки, допускается потеря напряжения, величина которой не превышает 6% от номинального напряжения потребителя:

$$\Delta U_{\text{доп}} \leq 0,06 U_{\text{ном}}.$$

В осветительных сетях допускается потеря напряжения не более 2,5%:

$$\Delta U_{\text{доп}} \leq 0,025 U_{\text{ном}}.$$

В зависимости от конкретных условий могут быть установлены и другие предельные значения потери напряжения.

Несоблюдение норм потери напряжения приводит к нарушению работы потребителей, уменьшению пусковых и вращающих моментов двигателей, изменению светового потока осветительных установок. Так, например, при уменьшении напряжения на 10% световой поток ламп накаливания уменьшается почти на одну треть. Незначительное

превышение напряжения по отношению к номинальному приводит к резкому сокращению срока службы ламп накаливания.

Нетрудно заметить, что в цепях постоянного тока понятия падения и потери напряжения совпадают:

$$\Delta U = I R_{\text{пр}},$$

где I — ток в линии; $R_{\text{пр}}$ — сопротивление проводов линии.

Несколько сложнее выглядят эти зависимости в цепях переменного тока. Рассмотрим векторную диаграмму, изображенную на рис. 12.4. Протекающий по линии ток нагрузки I сдвинут относительно напряжения U на угол φ , определяемый коэффициентом мощности нагрузки. Падение напряжения на активном сопротивлении линии I_R совпадает по фазе с током I , а падение напряжения на реактивном сопротивлении линии I_x опережает по фазе ток I на 90° (считаем, что емкостное сопротивление линии меньше ее индуктивного сопротивления). В этом случае падением напряжения называют векторную разность напряжений в начале и в конце линии:

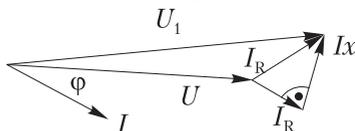


Рис. 12.4

В этом случае падением напряжения называют векторную разность напряжений в начале и в конце линии:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U} = iZ,$$

где Z — комплекс полного сопротивления линии.

Однако для потребителя важна величина (действующее значение) напряжения, а не его фаза. Поэтому целесообразно ввести понятие потери напряжения как разности действующих значений напряжений U_1 и U :

$$\Delta U = U_1 - U.$$

Потеря напряжения ΔU сложным образом выражается через модуль вектора $\Delta \dot{U}$. В практических расчетах принимают, что потеря напряжения (отрезок ac на рис. 12.5) равна проекции вектора падения напряжения $\Delta \dot{U} = iZ$ на вектор \dot{U} (отрезок ab на рис. 12.5).

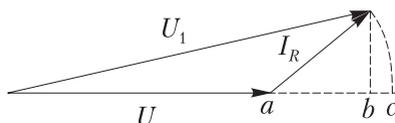


Рис. 12.5

При расчете сетей напряжением до 1000 В особо

важное значение имеет тот случай, когда реактивное сопротивление линий мало по сравнению с их активным сопротивлением и им можно пренебречь. Векторная

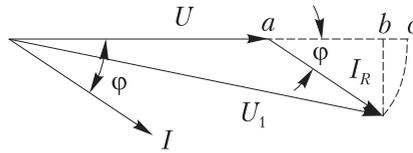


Рис. 12.6

диаграмма токов и напряжений для этого случая представлена на рис. 12.6. Из векторной диаграммы находим, что ΔU равно отрезку \overline{ac}

$$\Delta U = U_1 - U = \overline{ac},$$

а отрезок \overline{ab} выражаем через $\cos \varphi$ и модуль вектора I_R падения напряжения в линии: $\overline{ab} = IR \cos \varphi$. Полагая $\overline{ac} \approx \overline{ab}$, получаем

$$\Delta U \approx IR \cos \varphi,$$

где ΔU — потеря напряжения в линии; I — ток нагрузки, протекающий в проводах линии; R — активное сопротивление проводов линии; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности потребителя электроэнергии.

Карточка № 12.4 (183)

Падение и потеря напряжения в линиях постоянного и переменного тока

Напряжение на зажимах источника электроэнергии в сети постоянного тока 26 В. Напряжение на зажимах потребителя 25 В. Определите потерю напряжения в процентах.	1%	193
	2%	21
	4%	228
На схеме, приведенной на рис. 12.7, $R = 0,05$ Ом — сопротивление одного провода. Через нагрузку течет постоянный ток силой 10 В. Определите потерю напряжения.	0,5 В	53
	1 В	200
	2 В	88
	Для решения задачи недостаточно данных	234

Продолжение карт. № 12.4

В сети переменного тока $U_1 = 230 \text{ В}, U = 220 \text{ В}$. Определите: а) потерю напряжения; б) падение напряжения.	а) 10 В; б) определить не- льзя	117
	а) Определить нельзя; б) 10 В	206
	а) 10 В; б) 10 В	8
На схеме, приведенной на рис. 12.7, $R = 0,05 \text{ Ом}$. Реактивным сопротив- лением линии пренебрегаем. Через нагрузку течет переменный ток с действующим значением 10 А. Определите потерю напряжения.	0,5 В	240
	1 В	46
	2 В	122
В условиях предыдущей задачи угол сдвига по фазе между током и напряжением равен 60° . Определите потерю напряжения.	Для решения задачи недостаточно данных	83
	0,5 В	155
	1 В	112
	2 В	128
	Для решения задачи недостаточно данных.	2

12.5. Расчет проводов по допустимой потере напряжения линий постоянного, однофазного и трехфазного токов

На рис. 12.7 изображена сеть постоянного тока. Выразим потерю напряжения через ток в линии и сопротивление проводов:

$$\Delta U = U_1 - U = I R_{\text{пр}}.$$

Сопротивление проводов выразим через длину l линии и характеристики проводов $R_{\text{пр}} = \frac{2l}{\sigma S}$. Здесь S — площадь поперечного сечения провода, мм^2 ; σ — удельная проводимость материала провода, $\text{м/Ом} \cdot \text{мм}^2$.

Для меди $\sigma_{\text{м}} = 53 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$; для алюминия $\sigma_{\text{а}} = 32 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$. Коэффициент 2 учитывает, что линия двухпроводная.

После подстановки получаем

$$\Delta U = \frac{I \cdot 2l}{\sigma S},$$

откуда

$$S = \frac{2 \cdot Il}{\sigma \Delta U}.$$

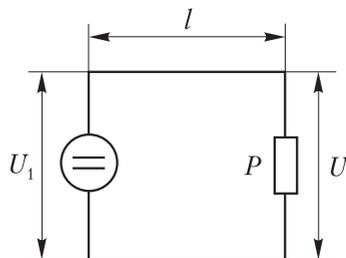


Рис. 12.7

Для удобства расчетов последнюю формулу несколько преобразуют, для чего умножают числитель и знаменатель на напряжение U :

$$S = \frac{2 \cdot Il}{\sigma \Delta U} \cdot \frac{U}{U} = \frac{2lP}{\sigma \Delta U \cdot U}.$$

Кроме того, в формулу вводят процентную потерю напряжения, подставляя вместо ΔU выражение

$$\Delta U = \frac{\Delta U \% U}{100}.$$

Окончательно

$$S = \frac{200lP}{\sigma \Delta U \% U^2}.$$

Площадь сечения определяется в мм^2 ; длина линии подставляется в м, мощность потребителя — в Вт, напряжение — в В. Размерность удельной проводимости указана ранее.

Электрическая сеть однофазного переменного тока изображена на рис. 12.8. Будем пренебрегать реактивным сопротивлением в линии. В конце предыдущего параграфа мы нашли, что в этом случае

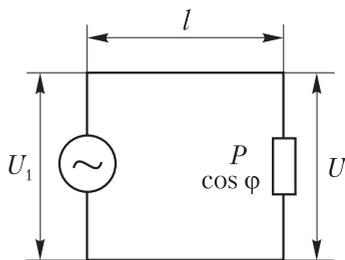


Рис. 12.8

$$\Delta U = U_1 - U = IR \cos \phi.$$

Заменяем ΔU и R :

$$\frac{\Delta U \% U}{100} = \frac{I \cdot 2l}{\sigma S} \cdot \cos \varphi.$$

Отсюда находим

$$S = \frac{2Il \cos \varphi \cdot 100}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U}.$$

Умножив числитель и знаменатель на U , получим

$$S = \frac{2Il \cos \varphi \cdot 100 U}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U} = \frac{200lUI \cos \varphi}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2}.$$

Окончательно записывают

$$S = \frac{200lP}{\sigma \cdot \Delta U \% U^2},$$

где $P = UI \cos \varphi$ — активная мощность потребителя.

На рис. 12.9 изображена трехфазная сеть переменного тока с симметричной нагрузкой. Имеем:

$$\Delta U_{\phi} = U_{\phi 1} - U_{\phi} = IR_1 \cos \varphi,$$

где I — линейный ток; R_1 — сопротивление одного провода трехпроводной линии

$$R_1 = \frac{l}{\sigma S}.$$

В таблицах обычно дается потеря и линейного напряжения, которая в $\sqrt{3}$ раз больше потери фазного напряжения.

Таким образом,

$$\Delta U = \sqrt{3} \Delta U_{\phi} = \sqrt{3} IR \cos \varphi = \sqrt{3} I \frac{l}{\sigma S} \cos \varphi.$$

Отсюда определяем

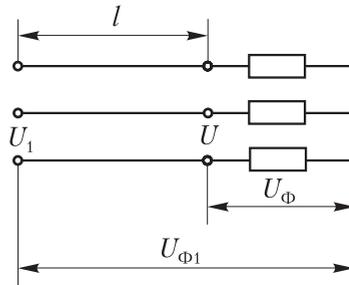


Рис. 12.9

$$S = \frac{\sqrt{3} I I \cos \varphi}{\sigma \cdot \Delta U} = \frac{\sqrt{3} I I \cos \varphi}{\sigma \frac{\Delta U \% U}{100}} = \frac{100 I \sqrt{3} I \cos \varphi}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U}.$$

Умножив числитель и знаменатель последнего выражения на линейное напряжение U , окончательно найдем

$$S = \frac{100 I P}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2},$$

где $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ — активная мощность, потребляемая симметричной трехфазной нагрузкой.

Карточка № 12.5 (259)

Расчет проводов по допустимой потере напряжения линий постоянного, однофазного и трехфазного токов

Определите сечение медных проводов линии 110 В постоянного тока. Длина линии 53 м. Передаваемая мощность 12,1 кВт. Допускается потеря 5%.	10 мм ²	159
	20 мм ²	42
	40 мм ²	135
	400 мм ²	76
Определите сечение алюминиевых проводов однофазной линии 220 В. Длина линии 320 м. По линии передается активная мощность 2,42 кВт. Допускается потеря напряжения 2,5%.	10 мм ²	166
	20 мм ²	107
	40 мм ²	142
	400 мм ²	101
В условиях предыдущей задачи сечение проводов выбрано равным 50 мм ² . Какой будет потеря напряжения в линии?	2%	173
	20%	36
	25%	149
	0,2%	70
Определите сечение алюминиевых проводов трехфазной линии 380 В. Длина линии 144,4 м. Линия питает асинхронный двигатель, потребляющий активную мощность 16 кВт. Допускается потеря напряжения 5%.	10 мм ²	179
	20 мм ²	95
	40 мм ²	14
	100 мм ²	64
Чему будет равняться сечение проводов в условиях предыдущей задачи, если допустимую потерю напряжения уменьшить в 2 раза?	10 мм ²	244
	20 мм ²	30
	40 мм ²	186
	100 мм ²	28

12.6. Сопоставление двухпроводной однофазной системы передачи энергии с трех- и четырехпроводной системами трехфазного тока по расходу цветного металла

Сравним по расходу цветного металла две линии, изображенные на рис. 12.10. Длины линий, напряжения источников питания, напряжения, мощности и коэффициенты мощности потребителей одинаковы.

Для двухпроводной линии переменного тока

$$S_{\text{двухпров}} = \frac{200lP}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2}.$$

Для трехфазной трехпроводной линии

$$S_{\text{трехпров}} = \frac{100lP}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2}.$$

Сравнивая эти выражения, находим, что сечение каждого провода трехпроводной линии в 2 раза меньше сечения провода двухпроводной линии:

$$S_{\text{трехпров}} = \frac{S_{\text{двухпров}}}{2}.$$

Обозначим массу одного провода трехпроводной линии через m . Тогда масса одного провода двухпроводной линии равна $2m$. Масса трех проводов трехпроводной линии равна $3m$, а масса двух проводов двухпроводной линии равна $2 \cdot 2m = 4m$. Следовательно, масса трехпроводной линии составляет $\frac{3}{4} = 0,75$ от массы двухпроводной линии, а экономия в металле — 25%.

Условия работы потребителей в сетях, изображенных на рис. 12.10, будут совершенно

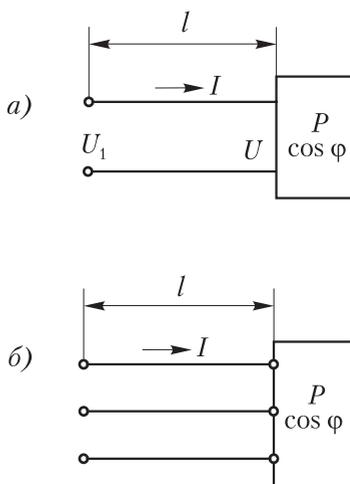


Рис. 12.10

одинаковы только в том случае, если трехфазная нагрузка соединена треугольником. Действительно, только в этом случае потребители, включенные в однофазную сеть (а) будут находиться под тем же напряжением, что и потребители, включенные в трехфазную сеть (б).

Если потребители в трехфазной сети соединить звездой, то они окажутся под напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньшим. Чтобы напряжение сети довести до номинального, потребуется в $\sqrt{3}$ раз увеличить напряжение на передающем и приемном конце трехпроводной линии (рис. 12.11). При этом сечение провода будет определяться формулой

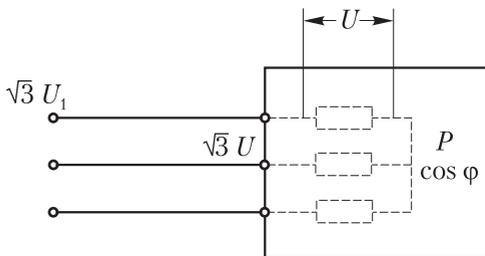


Рис. 12.11

$$S'_{\text{трехпров}} = \frac{100IP}{\sigma \cdot \Delta U \% (\sqrt{3}U)^2} = \frac{1}{3} \frac{100IP}{\sigma \cdot \Delta U \% U^2} = \frac{1}{3} S_{\text{трехпров}} .$$

Следовательно, сечение и вес проводов при соединении нагрузки звездой уменьшаются в 3 раза.

Если при соединении треугольником масса трехпроводной линии составляет $\frac{3}{4}$ от массы двухпроводной, то при соединении звездой он будет равен $\frac{1}{4}$, а экономия в массе составит 75%.

Чтобы обеспечить постоянство и симметрию напряжений на фазах звезды при несимметричной нагрузке, необходим нулевой провод. Сечение нулевого провода берется равным половине сечения линейного провода. Можно подсчитать, что при наличии такого нулевого провода экономия в массе составит 71%.

Все сказанное иллюстрируется диаграммой, представленной на рис. 12.12.

Столь значительная экономия в массе при использовании четырехпроводной системы объясняется тем, что в этой системе передача энергии происходит при повышенном напряжении (например, при линейном напряжении

380 В), а потребление энергии — при заданном напряжении (например, 220 В). Причем такое соотношение напряжений достигается без использования понижающих трансформаторов, за счет свойств самой системы.

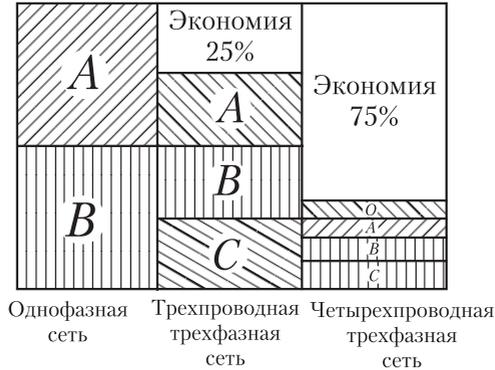


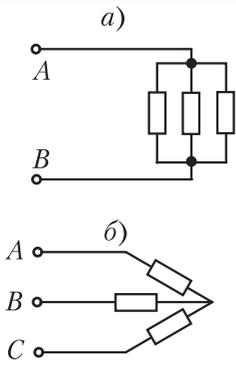
Рис. 12.12

Карточка № 12.6 (195)

Сопоставление двухпроводной однофазной системы передачи электроэнергии с трех- и четырехпроводной системами трехфазного тока по расходу металла

При равных условиях мощность P передается по однофазной и трехфазной трехпроводной линиям. Масса одного провода двухпроводной линии 100 кг. Чему равна масса трехпроводной линии?	150 кг	220
	200 кг	60
	300 кг	189
При прочих равных условиях напряжение на зажимах потребителя увеличено в 2 раза. Как изменится масса линии электропередачи?	Увеличился в 2 раза	93
	Не изменился	223
	Уменьшится в 2 раза	214
	Уменьшится в 4 раза	194

Продолжение карт. № 12.6

Три одинаковых потребителя электроэнергии в случае <i>a</i> соединены треугольником, в случае <i>б</i> — звездой. Все другие условия одинаковы. Что можно сказать о массе линий электропередачи?	В случае <i>a</i> масса в 3 раза больше, чем в случае <i>б</i>	22
	В случае <i>б</i> масса в 3 раза больше, чем в случае <i>a</i>	229
	Массе линий электропередачи одинаковы	54
	В случае <i>б</i> масса в 3 раз меньше, чем в случае <i>a</i>	201
 <p>а)</p> <p>б)</p>	В случае <i>a</i> масса в 3 раза больше, чем в случае <i>б</i>	89
	В случае <i>б</i> масса в 3 раза больше, чем в случае <i>a</i>	235
	В случае <i>a</i> масса в 4 раза больше, чем в случае <i>б</i>	118
При прочих равных условиях три одинаковых потребителя соединены по схеме <i>a</i> ; по схеме <i>б</i> . Что можно сказать о массе линий электропередачи?	Массы линий электропередачи одинаковы	207
При равных прочих условиях мощность P передается по однофазной и трехфазной четырехпроводной линиям. Масса одного провода двухпроводной линии 100 кг. Чему равна масса четырехпроводной линии?	71 кг	9
	58 кг	241
	29 кг	47
	142 кг	23

12.7. Расчет проводов по допустимому нагреву

Тепловой режим провода определяется уравнением теплового равновесия

$$I^2 R t = c F (\theta - \theta_0) t.$$

Левая часть этого уравнения выражает количество тепла, выделяемого током I за время t в проводе, сопротивление которого равно R (закон Джоуля — Ленца).

Правая часть уравнения определяет количество тепла, отдаваемого проводом в окружающую среду за время t . Очевидно, что в установившемся режиме количество выделяющегося тепла равно количеству тепла, переходящего в окружающую среду.

Здесь F — поверхность провода; c — коэффициент теплоотдачи — количество тепла, отводимого в 1 с с 1 м² поверхности при разности температур поверхности провода и окружающей среды, равной 1° С; θ — температура провода; θ_0 — температура окружающей среды.

Произведя в исходном уравнении подстановки в соответствии с известными равенствами

$$R = \frac{l}{\sigma S}; \quad F = \pi d l; \quad d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}},$$

получаем

$$I^2 \frac{l}{\sigma S} t = c \pi \sqrt{\frac{4S}{\pi}} l (\theta - \theta_0) t.$$

Здесь l — длина провода; S — площадь поперечного сечения провода; σ — удельная электропроводность.

Последнее равенство преобразуют к виду

$$I = k S^{3/4} \cdot \sqrt{\sigma(\theta - \theta_0)},$$

где $k = \sqrt{2c\sqrt{\pi}}$.

Температура поверхности голого провода не должна превышать 70 °С, а провода с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией — 65 °С. За расчетное значение температуры окружающей среды принимают максимальную среднемесячную температуру, которая колеблется от 15 °С в северных районах до 35 °С в южных.

Подставляя в формулу площадь поперечного сечения провода, находят максимально допустимый ток, соответствующий заданным условиям. Так как формула довольно

громоздка, то обычно пользуются заранее составленными таблицами. Если выбрано сечение провода, то таблица позволяет определить максимально допустимый ток, если известен ток, протекающий по проводу, то таблица позволяет найти соответствующее сечение провода.

Площадь поперечного сечения провода S рассчитывается сначала по допустимой потере напряжения, а затем по допустимому нагреву. Из полученных значений S берут большее и округляют его до ближайшего стандартного значения, определяемого ГОСТом.

Карточка № 12.7 (177)

Расчет проводов по допустимому нагреву

При прочих неизменных условиях диаметр провода увеличился в 2 раза. Как изменились: а) левая часть; б) правая часть уравнения теплового равновесия?	а) Уменьшилась в 2 раза; б) увеличилась в 2 раза	84
	а) Уменьшилась в 4 раза; б) увеличилась в 2 раза	156
	а) Увеличилась в 2 раза; б) увеличилась в 2 раза	113
При прочих неизменных условиях площадь поперечного сечения провода увеличилась в 4 раза. Как изменилась проводимость провода?	а) Уменьшилась в 2 раза; б) увеличилась в 2 раза	129
	а) Уменьшилась в 4 раза; б) увеличилась в 2 раза	3
	а) Увеличилась в 2 раза; б) увеличилась в 2 раза	160
Как должна измениться температура поверхности провода, чтобы в условиях предыдущей задачи не нарушилось уравнение теплового равновесия?	Разность $\theta - \theta_0$ должна увеличиться в 4 раза	43
	Разность $\theta - \theta_0$ должна уменьшиться в 8 раз	136
	Разность $\theta - \theta_0$ должна уменьшиться в 2 раза	77
Как изменится температура провода, нагреваемого током, если при прочих неизменных условиях увеличить длину провода?	Увеличится	167
	Не изменится	108
	Уменьшится	143

Продолжение карт. № 12.7

Провод нагревается током. Площадь поперечного сечения провода увеличилась в 2 раза. Как должен измениться ток, чтобы при прочих неизменных условиях температура поверхности провода не изменилась?	Ток должен увеличиться в 2 раза	102
	Ток должен увеличиться в $\sqrt[4]{8}$ раз	174
	Ток должен увеличиться в 4 раза	37
	Ток должен уменьшиться	150

12.8. Плавкие предохранители. Характеристики плавких вставок

Предохранители предназначены для защиты электрических сетей от перегрузок и коротких замыканий. Наибольшее распространение получили плавкие предохранители, которые дешевы и просты по устройству.

Плавкий предохранитель состоит из двух основных частей: корпуса (патрона) из электроизоляционного материала и помещенной внутри плавкой вставки. Концы плавкой вставки соединены с клеммами, при помощи которых предохранитель включается в линию последовательно с защищаемым потребителем или участком цепи. Плавкая вставка выбирается с таким расчетом, что она плавится раньше, чем температура проводов защищаемой линии достигает опасного уровня или перегруженный потребитель выходит из строя.

По конструктивным особенностям различают пластинчатые, патронные, трубчатые и пробочные предохранители.

Плавкие вставки изготавливаются на токи 4, 6, 10, 15, 25, 35, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 225, 260, 300, 350, 430, 500, 600, 700, 850, 1000 А. Оговаривается также максимально допустимое напряжение, при котором может использоваться тот или иной плавкий предохранитель.

Основной характеристикой плавкой вставки является ампер-секундная характеристика, изображенная на

рис. 12.13. Эта характеристика снимается экспериментально следующим образом: берется партия одинаковых предохранителей, и эти предохранители последовательно пережигаются при различных токах. Замеряют время, по истечении которого вставка перегорает, и ток, протекающий через вставку. Поскольку параметры вставок имеют некоторый разброс,

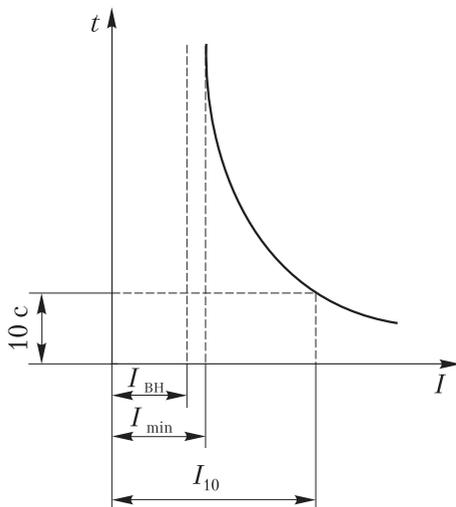


Рис. 12.13

при одном и том же токе пережигают несколько вставок и берут среднее время. Таким образом, каждому току, пропускаемому через вставку, соответствует определенное время, по истечении которого она перегорает. По этим данным и строится ампер-секундная характеристика.

На ампер-секундной характеристике особо выделяются следующие токи, которые используются для выбора плавких вставок.

I_{\min} — наименьший из токов, расплавляющих вставку; при I_{\min} вставка еще плавится, но в течение неопределенно продолжительного времени (1–2 ч); при токах, меньших I_{\min} , вставка уже не расплавляется.

I_{10} — десятисекундный ток, т.е. ток, при котором плавление вставки и отключение сети происходит через 10 с после установления тока;

I_{BH} — номинальный ток вставки, т.е. ток, при котором плавкая вставка длительно работает, не нагреваясь выше допустимой температуры; номинальный ток связан с десятисекундным током простым соотношением:

$$I_{\text{BH}} = I_{10} / 2,5.$$

При построении ампер-секундной характеристики по оси абсцисс иногда откладывают не абсолютное значение тока, а отношение тока к его номинальному значению (рис. 12.14).

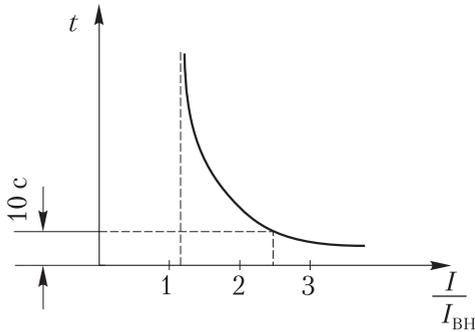


Рис. 12.14

Если ампер-секундная характеристика неизвестна, то номинальный ток плавкой вставки можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$I_{\text{ВН}} = \frac{k\sqrt{d^3}}{2,5},$$

где d — диаметр проволоки в мм; k — коэффициент, зависящий от материала плавкой вставки (для меди $k = 80$).

По известной величине номинального тока можно найти I_{min} . Обычно $I_{\text{min}} = (1,3 - 1,5)I_{\text{ВН}}$.

Карточка № 12.8 (310)

Плавкие предохранители. Характеристики плавких вставок

Температура плавления меди выше температуры плавления алюминия. Можно ли предохранитель с медной плавкой вставкой использовать для защиты линии из алюминиевых проводов?	Можно	71
	Нельзя	180
Может ли ампер-секундная характеристика пересечь: а) ось абсцисс (ось токов); б) ось ординат (ось времени)?	а) Может; б) может	96
	а) Может; б) не может	15
	а) Не может; б) не может	65
	а) Не может; б) может	245

Продолжение карт. № 12.8

$I_{\min} = 10 \text{ A}$. Расплавится ли вставка при токах: а) 9 А; б) 11 А?	а) Да; б) да	31
	а) Нет; б) да	61
	а) Да; б) нет	190
	а) Нет; б) нет	224
При токе 25 А вставка расплавляется через 10 с. Определите номинальный ток плавкой вставки.	4 А	215
	6 А	195
	10 А	23
	15 А	230
Найдите номинальный ток медной плавкой вставки диаметром 1 мм.	19 А	55
	26 А	202
	32 А	90
	54 А	236

12.9. Выбор плавких вставок для световой, силовой и групповой нагрузок. Особенности установки предохранителей в четырехпроводных сетях трехфазного тока

На выбор плавких вставок существенное влияние оказывает характер нагрузки. Если при включении нагрузки не возникает токов, превышающих рабочий ток потребителей I_p , что характерно для осветительных и нагревательных приборов, то вставка выбирается из условия

$$I_{\text{вн}} \geq I_p,$$

т.е. номинальный ток плавкой вставки должен быть равен рабочему току потребителей или превышать его. При выполнении этого условия не может произойти отключения сети в отсутствие аварийного режима.

При выборе вставки для защиты двигателя необходимо учитывать пусковой ток двигателя $I_{\text{пуск}}$:

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a}.$$

При выполнении этого условия двигатель не будет отключаться от сети при пуске.

Коэффициент a , зависит от длительности пуска. Если длительность пуска не превышает 10 с, берут $a = 2,5$; если длительность пуска превышает 10 с, выбирают $a = 1,8$.

Если вставка защищает участок сети, где имеется группа потребителей, включающая несколько двигателей и световую нагрузку, то выбор вставки определяется двумя условиями:

$$1) I_{\text{вн}} \geq m \sum_{k=1}^n I_{\text{рк}} ;$$

$$2) I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск. макс}} + m \sum_{k=1}^{n-1} I_{\text{рк}}}{2,5} .$$

Здесь $I_{\text{рк}}$ — рабочий ток k -го потребителя; n — количество потребителей; m — коэффициент одновременности работы потребителей; $I_{\text{пуск. макс}}$ — наибольший пусковой ток из пусковых токов потребителей; $\sum_{k=1}^{n-1} I_{\text{рк}}$ — сумма номинальных (рабочих) токов всех потребителей, кроме двигателя, имеющего наибольший пусковой ток.

При выполнении этих условий не произойдет отключения сети ни при нормальной работе потребителей, ни в момент пуска любого (одного) двигателя при нормальной одновременной работе других потребителей. Из двух полученных значений номинального тока плавкой вставки берут большее и округляют до ближайшего стандартного значения.

Для селективной защиты различных участков сети необходимо, чтобы номинальные токи последовательно включенных вставок отличались на 1–2 ступени, увеличиваясь по мере приближения к источнику питания.

Конечно, всегда надо следить за тем, чтобы номинальный ток выбранной плавкой вставки был меньше допустимого из условий нагрева тока провода, куда включена плавкая вставка. Иначе при перегрузках провод будет перегреваться, а плавкая вставка его не отключит.

Отметим также особенности установки предохранителей в четырехпроводных сетях трехфазного тока. В таких сетях установка предохранителей для защиты от перегрузок и коротких замыканий допускается только в трех линейных проводах.

Установка предохранителей в нулевом проводе запрещается, так как отключение нулевого провода само приводит к аварийному режиму работы четырехпроводной сети. При отключении нулевого провода нарушается симметрия фазных напряжений и нормальная работа всех потребителей, включенных между линейными и нулевым проводами. В частности, в случае осветительной нагрузки, в одной или двух фазах лампы будут гореть вполнакала, в других фазах лампы окажутся под повышенным напряжением и быстро перегорят.

Карточка 12.9 (221)

Выбор плавких предохранителей для световой, силовой и групповой нагрузок

Участок осветительной сети потребляет ток 12 А.	6 А	119
	10 А	208
Укажите номинальный ток плавкой вставки предохранителя, защищающего этот участок.	15 А	10
	25 А	242
Укажите номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты двигателя. $I_p = 6 \text{ А};$ $I_{\text{пуск}} = 30 \text{ А}.$ Длительность пуска 5 с.	6 А	48
	10 А	124
	15 А	85
	35 А	157
Укажите номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты двигателя. $I_p = 30 \text{ А};$ $I_{\text{пуск}} = 180 \text{ А}.$ Длительность пуска 15 с.	60 А	114
	80 А	130
	100 А	4
	200 А	161
Двигатель, рассмотренный во втором вопросе, включен параллельно со световой нагрузкой 20 А. Укажите номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты этой групповой нагрузки.	6 А	44
	25 А	137
	35 А	78
	60 А	168

Продолжение карт. № 12.9

Двигатель, рассмотренный в третьем вопросе, включен параллельно со световой нагрузкой 20 А. Укажите номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты этой групповой нагрузки.	60 А	109
	80 А	144
	100 А	103

12.10. Выбор сечения проводов в зависимости от установленных предохранителей

В коротких линиях, где потеря напряжения невелика, иногда целесообразно начинать расчет с выбора предохранителей по формулам, рассмотренным в предыдущем параграфе.

Тогда сечения проводов определяются по рабочим токам потребителей или номинальным токам выбранных плавких вставок следующим образом.

1. Сеть защищается только от коротких замыканий. Сечение провода выбирается из условия

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р}},$$

где $I_{\text{доп}}$ — максимально допустимый по условиям нагрева ток выбранного провода (приводится в таблицах); $I_{\text{р}}$ — рабочий ток потребителей. При выполнении этого условия, провод не будет перегреваться при нормальной работе потребителей.

Затем уточняют сечение провода из условия

$$I_{\text{вн}} \leq 3I_{\text{доп}},$$

т.е. номинальный ток плавкой вставки должен быть не больше утроенной силы тока, допустимой из условий нагрева провода.

При выполнении этого условия гарантируется, что при коротком замыкании плавкая вставка перегорит раньше, чем провод нагреется до опасной температуры. Если это условие не выполняется, берут провод большего сечения с большим допустимым током.

2. Сеть защищается от перегрузок (и коротких замыканий). Такая защита требуется для осветительных сетей в жилых и

промышленных помещениях, а также для защиты электросетей на взрывоопасных объектах.

Сечение провода выбирается из условия

$$I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{вн}} .$$

В этом случае надежное отключение линии будет происходить при токах, примерно на 30% превышающих допустимый ток проводов. Действительно, наименьший из токов, которые плавят вставку, связан с номинальным током плавкой вставки соотношением, приведенным в конце 12.8:

$$I_{\text{мин}} = 1,5 I_{\text{вн}} \quad \text{или} \quad I_{\text{вн}} = \frac{I_{\text{мин}}}{1,5} .$$

После подстановки найдем

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{1,25}{1,5}; \quad I_{\text{мин}} = 0,83 I_{\text{мин}} .$$

Если через провод будет протекать ток I , примерно на 30% превышающий допустимый ток, то ток I заведомо будет превышать ток плавления вставки и сеть будет отключена:

$$I = 1,3 I_{\text{доп}} = 1,3 \cdot 0,83 I_{\text{мин}} = 1,08 I_{\text{мин}} .$$

При перегрузках, меньших 20%, сеть отключаться не будет:

$$1,2 I_{\text{доп}} = 0,996 I_{\text{мин}} .$$

Карточка № 12.10

Выбор сечения проводов в зависимости от установленных предохранителей

Для защиты сети от коротких замыканий выбрана плавкая вставка с номинальным током 35 А. Можно ли для питания нагрузки использовать провод с допустимым по нагреву током 15 А?	Можно	175
	Нельзя	38

Продолжение карт. № 12.10

Можно ли в предыдущем случае выбрать провод с допустимым током: а) 10 А; б) 20 А?	а) Можно; б) можно	151
	а) Можно; б) нельзя	72
	а) Нельзя; б) нельзя	181
	а) Нельзя; б) можно	97
Номинальный ток плавкой вставки, защищающей участок сети от перегрузок и коротких замыканий, равен 60 А. Определите допустимый ток провода.	60 А	16
	75 А	66
	180 А	246
Укажите номинальный ток, при котором произойдет отключение линии в условиях предыдущей задачи.	75 А	32
	80 А	62
	90 А	191
	100 А	225
Какую защиту проще осуществить?	От перегрузок	216
	От коротких замыканий	196

12.11. Действие электрического тока на организм человека. Понятие о напряжении прикосновения. Допустимые значения напряжения прикосновения в зависимости от характера помещений

При прохождении электрического тока через организм человека в первую очередь поражается центральная нервная система, в результате чего нарушается работа сердечной мышцы и происходит остановка дыхания. Степень поражения зависит от величины тока, частоты и пути протекания тока через организм человека. При прочих равных условиях наибольшее физиологическое воздействие на человека оказывают токи с частотой 50–60 Гц. Наиболее опасны пути тока, проходящие через нервные центры дыхания и сердечной деятельности (например, правая рука — левая нога). Что касается величины тока, то неприятные ощущения возникают уже при токах в

несколько миллиампер. При токе величиной 25 мА (0,025 А) наступает судорожное сокращение мышц, и человек оказывается не в состоянии самостоятельно разжать пальцы и освободиться от провода, находящегося под током. При токе 100 мА (0,1 А) практически мгновенно наступает паралич дыхания и сердца.

Правилами техники безопасности за безусловно опасный принят ток величиной 50 мА (0,05 А).

Значительным электрическим сопротивлением обладает только поверхностный ороговевший слой кожи человека. Это сопротивление зависит от многих причин (влажность кожи, степень расширения кожных капилляров и др.) и колеблется в широких пределах от 800 до 100 000 Ом. Сопротивление резко снижается, например, при принятии алкоголя. Если принять сопротивление тела человека равным 1000 Ом, то опасный ток будет протекать, если к человеку приложено напряжение

$$U = I \cdot R_{\text{чел}} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ В.}$$

При этом источник должен отдавать мощность

$$P = UI = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Вт.}$$

Если мощность источника значительно меньше указанной цифры, то высокие напряжения не могут вызвать общего поражения человека, но вызывают неприятные ощущения.

При неисправности изоляции токонесущих частей электро-технических установок неизолированные металлические конструкции могут оказаться под напряжением. Под напряжением окажется и человек, коснувшийся такой металлической конструкции. Назовем это напряжение напряжением прикосновения.

Правилами техники безопасности опасными для человека считаются следующие напряжения прикосновения $U_{\text{пр}}$:

- в сухом помещении $U_{\text{пр}} = 65 \text{ В}$;
- в сырых помещениях с относительной влажностью 75% и токопроводящими полами $U_{\text{пр}} = 36 \text{ В}$;
- в особо опасных помещениях (металлические кабины, котлы, помещения с относительной влажностью 100%) $U_{\text{пр}} = 12 \text{ В}$.

При погружении в воду сопротивление человека значительно снижается вследствие увеличения поверхности соприкосновения тела с проводящей средой и уменьшения удельного сопротивления кожи, поэтому даже сравнительно невысокие

напряжения могут оказаться смертельно опасными. По этой причине, в частности, в ванных комнатах не устанавливают розеток электропитания и выключателей, а осветительные приборы закрывают прозрачными колпаками.

Карточка № 12.11 (164)

**Действие электрического тока на организм человека.
Понятие о напряжении прикосновения. Допустимые значения напряжения прикосновения в зависимости от характера помещений**

Какой электрический фактор оказывает непосредственное физиологическое воздействие на организм человека?	Мощность	24
	Напряжение	231
	Ток	56
	Напряженность	203
Электрическое сопротивление человека 5000 Ом. Какой ток протекает через тело человека, находящегося под напряжением 380 В?	19 мА	237
	38 мА	120
	76 мА	209
	50 мА	11
При прочих равных условиях какой ток наиболее опасен?	Постоянный	49
	Переменный с частотой 50 Гц	125
	Переменный с частотой 50 мГц	86
	Опасность одинакова	115
Укажите наибольшее и наименьшее допустимые напряжения прикосновения, установленные правилами техники безопасности в зависимости от внешних условий?	127 В и 6 В	131
	65 В и 12 В	5
	36 В и 12 В	162
	65 В и 6 В	138
Опасен ли для человека источник электрической энергии, ЭДС которого 3000 В, а внутреннее сопротивление 1 МОм (10^6 Ом)?	Опасен	79
	Не опасен	169
	При некоторых условиях опасен	110

12.12. Защитное заземление трехпроводных сетей трехфазного тока

Вследствие того что сопротивление изоляции $R_{из}$ проводов электрической сети ограничено (не бесконечно велико) между линейными проводами возникают токи утечки I_y , которые замыкаются через землю. На рис. 12.15 распределенное по длине провода сопротивление изоляции для наглядности условно изображено сосредоточенным.

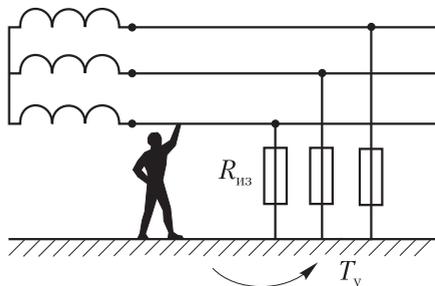


Рис. 12.15

Если человек, стоящий на земле, коснется даже одного оголенного провода линии, он окажется в опасности, так как почти весь ток утечки будет протекать через его тело, а величина тока утечки в мощных энергосистемах обычно превышает опасное значение 50 мА.

Действительно, как это очевидно из рис. 12.16, ток утечки распределяется между параллельными ветвями $R_{чел}$ и $R_{из}$, а поскольку $R_{из} \gg R_{чел}$, практически весь ток утечки будет проходить через человека.

Конечно, случаи, когда стоящий на земле человек касается оголенного провода энергосистемы, редки и должны быть исключены совсем. Для этого токоведущие части электроустановок закрываются кожухами, применяются ограждения и блокировки, автоматически выключающие напряжение, когда человек входит внутрь ограждений. В местах опасности вывешиваются таблицы и плакаты. Обслуживающий персонал проходит курс техники безопасности, инструктируется, снабжается резиновыми перчатками, ботами, изолирующими коврикками и подставками.

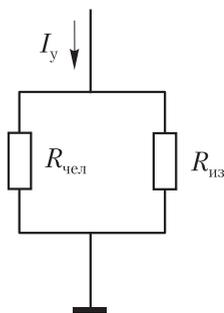


Рис. 12.16

Опасность протекания через тело человека токов утечки возникает в других случаях, а именно в случаях, когда вследствие повреждения изоляции под током оказываются

металлические части и станины машин, нормально не соединенные с токоведущими деталями.

Для обеспечения безопасности в этом случае применяется защитное заземление металлических частей электротехнических установок, нормально не находящихся под напряжением. Заземление осуществляется при помощи стальных труб, полос, уголков, которые закладываются в почву на достаточной глубине и соединяются с заземляемыми деталями стальными полосами (шинами). На рис. 12.17 показано такое защитное заземление.

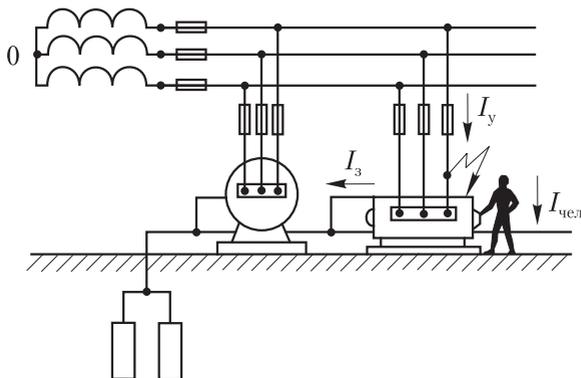


Рис. 12.17

Если произойдет повреждение изоляции и корпус двигателя окажется соединенным с проводом сети, то человеку, прикоснувшемуся к заземленному корпусу двигателя, не угрожает никакая опасность.

Действительно, в этом случае ток утечки распределяется между параллельными ветвями $R_{\text{чел}}$ и R_3 (рис. 12.18).

Поскольку сопротивление тела человека значительно больше, чем сопротивление заземлителя $R_{\text{чел}} \gg R_3$, то практически весь ток утечки будет проходить через заземлитель. Конечно, все сказанное справедливо, если заземлитель правильно рассчитан и тщательно выполнен. При повышенном сопротивлении заземлителя опасность поражения человека токами утечки остается.

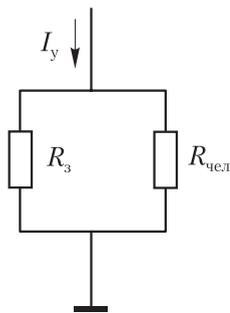


Рис. 12.18

Карточка № 12.12 (201)

Защитное заземление трехпроводных сетей трехфазного тока

Проводимость изоляций одного метра провода равна 10^{-7} См/м (сопротивление 10 МОм·м) Определите: а) проводимость; б) сопротивление изоляции провода длиной 2 км.	а) $5 \cdot 10^{-10}$ См; б) $0,2 \cdot 10^{10}$ Ом	145
	а) $2 \cdot 10^{-4}$ См; б) $5 \cdot 10^3$ Ом	104
	а) $2 \cdot 10^{-3}$ См; б) $0,5 \cdot 10^3$ Ом	176
	а) 10 См; б) 0,1 Ом	39
Определите ток утечки рассмотренного выше провода при напряжении 380 В.	19 мА	152
	38 мА	73
	76 мА	182
	50 мА	98
Параллельно сопротивлению изоляции рассмотренного выше провода подключено тело человека с сопротивлением 2600 Ом. Какая часть найденного тока утечки проходит через тело человека?	20 мА	17
	30 мА	67
	40 мА	247
	50 мА	33
Какой ток будет протекать через тело человека в условиях, рассмотренных выше, если параллельно человеку подключен заземлитель с сопротивлением 10 Ом?	76 мА	226
	50 мА	217
	5 мА	197
	Значительно меньше 1 мА	25
Какие части электротехнических установок заземляются?	Соединенные с токоведущими деталями	232
	Изолированные от токоведущих деталей	57

12.13. Защитное заземление четырехпроводных сетей трехфазного тока

В рассмотренных выше трехпроводных линиях при пробое изоляции и соединении одного из линейных проводов с корпусом двигателя защита из плавких предохранителей не срабатывает, так как токи утечки недостаточны для перегорания плавкой вставки. Чтобы срабатывала защита, можно было

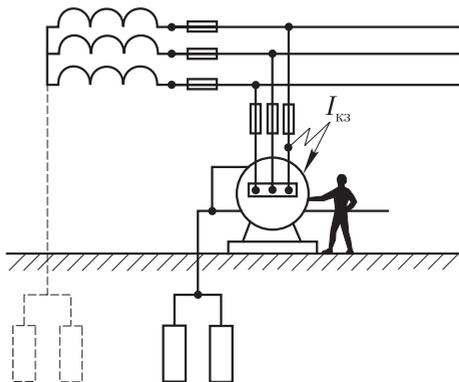


Рис. 12.19

бы точку 0, помеченную на рис. 12.17, заземлить, как это показано пунктиром на рис. 12.19. Тогда при пробое изоляции возникало бы короткое замыкание фазы через землю и плавкая вставка перегорела бы. Но такое заземление нулевой точки в трехпроводной сети недопустимо, так как прикосновение человека к корпусу поврежденного двигателя было бы смертельно опасным.

Действительно, в этом случае через параллельно соединенные заземлитель и тело человека будет протекать уже не ток утечки, а ток короткого замыкания (рис. 12.20) и, несмотря на то, что $R_3 \ll R_{\text{чел}}$, относительно небольшая часть тока короткого замыкания, протекающая через человека, в абсолютном выражении может значительно превышать опасный ток (50 мА).

Иначе обстоит дело в четырехпроводных сетях трехфазного тока. Здесь можно построить такую систему защиты, которая надежно срабатывала бы при каждом пробое изоляции и попадании напряжения на корпус двигателя. Для этого достаточно корпус двигателя и другие металлические части электротехнических установок, нормально не находясь

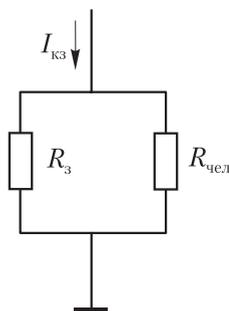


Рис. 12.20

дящихся под напряжением, надежно соединить с помощью стальных полос или проводов с нулевым проводом, как показано на рис. 12.21. Теперь пробой изоляции приводит к короткому замыканию фазы генератора. Соответствующая плавкая вставка в течение долей секунды перегорает и отключает от сети поврежденный участок.

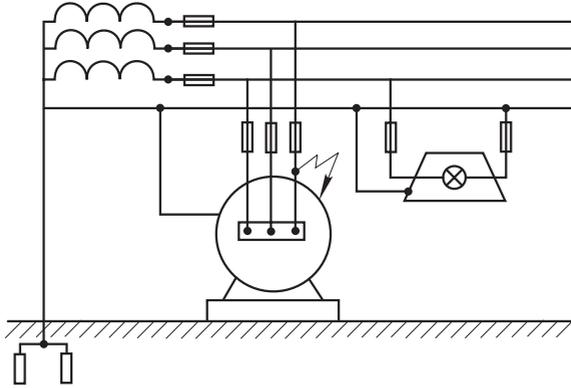


Рис. 12.21

Такое соединение металлических частей электротехнических установок с нулевым проводом иногда называют занулением.

Для перегорания плавкой вставки нужно некоторое время. В течение этого времени человек, прикоснувшийся к поврежденному двигателю, будет соединен с линейным проводом и через его тело потечет ток утечки. Чтобы защитить человека от тока утечки, корпус двигателя (и все металлические части электротехнических установок, не находящиеся под напряжением) нужно заземлить. Однако проще заземлить сам нулевой провод, так как все металлические части уже соединены с ним, и тогда нет необходимости тянуть дополнительные шины к электротехническим установкам. Полученная схема (она изображена на рис. 12.21) получила широкое распространение. Такую сеть называют четырехпроводной сетью с заземленной нейтралью.

Категорически запрещается в четырехпроводной сети трехфазного тока с заземленной нейтралью заземлять корпуса электротехнических установок, не соединив эти корпуса с нулевым проводом. Если нарушить этот запрет, получим опасную схему, изображенную на рис. 12.19.

Карточка № 12.13 (204)

Защитное заземление четырехпроводных сетей трехфазного тока

	Допустимо	204
Допустимо ли заземление средней точки генератора или питающего трансформатора для повышения безопасности в трехпроводной трехфазной цепи?	Такое заземление нецелесообразно, так как не влияет на условия безопасности	238
	Такое заземление недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения	210
Через параллельно соединенные заземлитель и тело человека протекает ток короткого замыкания 30 А. $R_3 = 10 \text{ Ом};$ $R_{\text{чел}} = 2990 \text{ Ом}.$ Определите ток, протекающий через тело человека.	10 мА	12
	29 мА	50
	50 мА	126
	100 мА	132
Можно ли для повышения безопасности корпус двигателя, соединенный с заземленной нейтралью, заземлить при помощи специального заземлителя?	Можно	6
	Нельзя	163
	Можно, но нецелесообразно	139
Можно ли для повышения безопасности корпус двигателя, не соединенный с заземленной нейтралью, заземлить при помощи специального заземлителя?	Можно	80
	Нельзя	170
	Можно, но нецелесообразно	146
Сработает ли защита из плавких предохранителей при пробое на корпус двигателя: а) в трехпроводной; б) в четырехпроводной сети трехфазного тока?	а) Да; б) да	105
	а) Нет; б) нет	177
	а) Да; б) нет	40
	а) Нет; б) да	153

12.14. Устройство и простейший расчет заземлителей

При выборе схемы заземления прежде всего следует оценить возможности использования в качестве заземлителей близко расположенные металлические конструкции: каркасы зданий, водопроводные трубы, отопительные системы и др. В электрических сетях напряжением до 1000 В общее сопротивление заземлителей не должно превышать 4 Ом при мощности сети 100 кВт и более 10 Ом при мощности сети менее 100 кВт:

$$R_3 \leq 4 \text{ Ом при } P \geq 100 \text{ кВт};$$

$$R_3 \leq 10 \text{ Ом при } P < 100 \text{ кВт}.$$

Если естественные заземлители отсутствуют или имеют сопротивление больше указанных значений, устанавливаются искусственные заземлители, в качестве которых применяют следующие.

1. Вертикально погруженные в почву стальные трубы длиной $l = 2\text{--}3$ м с толщиной стенок 3,5 мм и диаметром 25–50 мм.

2. Угловую сталь или стальные полосы толщиной 4 мм и площадью поперечного сечения не менее 48 мм² расположенные вертикально или горизонтально.

Наименьшее количество заземлителей $n = 2$. Расстояние между заземлителями $a = 0,5 l - l$. Глубина погружения $h = l/3$ (рис. 12.22). Число заземлителей n определяется делением сопротивления одного заземлителя на общее сопротивление заземления (4 или 10 Ом). При этом необходимо учитывать коэффициент использования заземлителей.

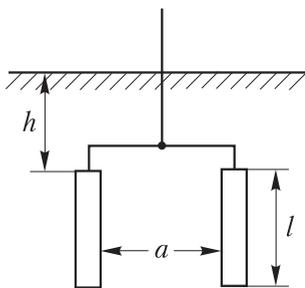


Рис. 12.22

Если в качестве заземлителя используется труба, то ее сопротивление подсчитывают по формуле

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \frac{\rho}{l}.$$

Аналогичная формула для полосы имеет вид

$$R_{\text{пол}} = 2,1 \frac{\rho}{l}.$$

Здесь ρ — удельное сопротивление почвы, приходящееся на каждый метр длины заземлителя. Примерные значения ρ (Ом·м) приведены ниже для некоторых видов почв (более точные и подробные данные берутся из справочника):

Суглинок.....	100
Чернозем.....	200
Песок.....	700
Камень.....	4000

Число труб или полос, используемых в качестве заземлителей, подсчитывается по формуле

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3 \eta},$$

где $R_{\text{тр}}$ — сопротивление трубы (полосы); R_3 — сопротивление заземления; η — коэффициент использования трубы (полосы).

Если расстояние между заземлителями равно их длине, то коэффициент использования заземлителя имеет следующие значения при разных количествах заземлителей:

$$\begin{aligned} n = 2; & \quad \eta = 0,9; \\ n = 3; & \quad \eta = 0,8; \\ n = 9; & \quad \eta = 0,7; \\ n = 22; & \quad \eta = 0,6. \end{aligned}$$

Карточка № 12.14 (201)

Устройство и простейший расчет заземлителей

В каких случаях допускается сопротивление заземлителя, большее 4, но меньше 10 Ом?	При мощности сети, превышающей 100 кВт .	74
	При мощности сети, меньшей 100 кВт	183
	При мощности сети, равной 100 кВт	39

Можно ли при мощности сети, меньшей 100 кВт, использовать естественные заземлители с общим сопротивлением 1 Ом?	Можно	18
	Нельзя	68
В суглинистую почву погружен заземлитель в виде трубы длиной 2 м. Определите сопротивление заземлителя.	45 Ом	248
	50 Ом	34
	55 Ом	198
	60 Ом	211
Найдите примерное количество труб (без учета коэффициента использования), необходимое для заземления нулевого провода сети мощностью меньше 100 кВт.	3	51
	5	133
	7	164
	9	140
Сколько рассмотренных выше труб надо разместить в суглинистой почве на расстоянии 2 м друг от друга, чтобы осуществить заземление нулевого провода сети мощностью меньше 100 кВт?	9	81
	3	171
	5	147
	6	19

Ответы на вопросы и консультации

К главе 1

Карточка № 1.1

Электрическая цепь

Вопрос № 1. Для передачи на дальние расстояния механической энергии потребовалась бы сложная и дорогостоящая система приводов, рычагов, зацеплений.

Передача тепловой энергии связана с большими потерями энергии и сравнительно малой скоростью теплоносителя.

Световая линия передачи энергии на дальние расстояния требует сложного оборудования для создания узких и мощных пучков света, подвержена воздействию атмосферных помех.

Линии электропередачи свободны от указанных недостатков, надежны и просты в эксплуатации, поэтому в настоящее время для дальних передач наиболее удобна электрическая энергия.

Вопрос № 2. Термогенератор и гальванический элемент служат не потребителями электрической энергии, а ее источниками. Поэтому правильным является только один ответ: «Прожектор, аккумуляторная батарея». Аккумуляторная батарея в режиме заряда работает как потребитель электрической энергии.

Вопрос № 3. Простая (неразветвленная) электрическая цепь состоит из одного замкнутого контура, по всем элементам которого протекает один и тот же ток. В рассматриваемой цепи через сопротивления R_0 , R_1 и R_2 протекают различные токи, поэтому эту цепь нельзя называть простой.

Путем эквивалентных преобразований рассматриваемую цепь можно привести к одноконтурной и рассчитывать как простую, но в непреобразованном виде эта цепь является сложной.

Вопрос № 4. Для того чтобы найти правильный ответ на этот вопрос, необходимо вспомнить два правила.

1. В цепи, состоящей из одного источника электрической энергии и нагрузки, соединенных проводами, ток протекает от плюсового зажима источника через нагрузку к минусовому зажиму. Внутри источника ток течет от минусового зажима к плюсовому.

2. Направление тока в такой цепи совпадает с направлением ЭДС.

Вопрос № 5. Источник, питающий нагрузку, создает ток, направленный от положительного зажима через нагрузку к отрицательному зажиму. Внутри источника ток направлен от отрицательного зажима к положительному. В том же направлении движутся и положительные заряды в цепи.

Карточка № 1.2 Электрический ток

Вопрос № 1. Принято считать, что направление тока совпадает с направлением движения положительных зарядов, при этом следует учитывать, что движение отрицательно заряженных электронов в каком-либо направлении эквивалентно движению положительных зарядов в противоположном направлении.

Вопрос № 2. Сила постоянного тока определяется отношением

$$I = \frac{Q}{t},$$

где Q — заряд, проходящий через поперечное сечение проводника, t — время, в течение которого проходит заряд Q .

Подставляя в эту формулу заряд, измеренный в кулонах, время, выраженное в секундах, находим силу тока в амперах:

$$I = \frac{60}{10 \cdot 60} = 0,1 \text{ А.}$$

Вопрос № 3. Через поперечное сечение проводника проходит один кулон электричества в секунду, если сила тока равна одному амперу.

Вопрос № 4. Поскольку заряд конденсатора увеличивается с течением времени неравномерно, то ясно, что зарядный ток непрерывно изменяется.

В этом случае сила тока находится из выражения

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Заряд как функция времени задан графически, поэтому для определения силы тока в указанный момент времени нужно выполнить графическое дифференцирование.

Можно поступить следующим образом: в окрестностях точки, соответствующей $t_1 = 7,5$ с, выбрать интервал времени, например $\Delta t = 5$ с (от $t = 5$ с до $t = 10$ с) и определить соответствующее увеличение заряда $\Delta Q = 2$ Кл (от $Q = 8$ Кл до $Q = 10$ Кл). Далее находим

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{2}{5} = 0,4 \text{ А}.$$

Вопрос № 5. Предполагая, что в течение указанного интервала времени заряд конденсатора уменьшался равномерно, находим

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = 1 \text{ А}.$$

Однако найденное значение силы тока является средним за интервал времени l с.

Мгновенное значение тока определяется выражением

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Поскольку в условии задачи требуется найти мгновенное значение силы тока, существующее в момент начала разряда, то точное решение задачи невозможно, так как неизвестен закон изменения заряда с течением времени.

Карточка № 1.3 Сопrotивление и проводимость

Вопрос № 1. Сопrotивление провода и его проводимость связаны простым соотношением

$$g = \frac{1}{R} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ Ом}^{-1}.$$

Единица измерения проводимости, имеющая размерность Ом^{-1} , называется сименсом.

Вопрос № 2. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление материала провода; l — длина провода; S — площадь поперечного сечения.

Производя подсчеты, не забудьте, что площадь поперечного сечения провода пропорциональна квадрату его диаметра d :

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Вопрос № 3. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление материала провода; l — длина провода; S — площадь поперечного сечения.

Как следует из условия задачи, числитель и знаменатель рассматриваемого выражения увеличиваются в 2 раза, поэтому

$$R' = \rho \frac{2l}{2S} = \rho \frac{l}{S} = R.$$

Здесь R' — сопротивление провода, имеющего удвоенную длину и удвоенную площадь поперечного сечения.

Вопрос № 4. Сопротивление металлических проводников при увеличении температуры увеличивается.

Сопротивление электролитов при увеличении температуры уменьшается. Такую же, как у электролитов, зависимость сопротивления от температуры имеет угольный стержень.

Вопрос № 5. Для решения задачи используем формулу

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha \Delta t),$$

где обозначены R_1 — сопротивление провода при температуре t_1 ; R_2 — сопротивление провода при температуре t_2 ;

Δt — изменение температуры провода $\Delta t = t_2 - t_1$; α — температурный коэффициент сопротивления.

При заданных значениях величин получаем

$$R_2 = 50(1 + 0,004 \cdot 250) = 100 \text{ Ом.}$$

Карточка № 1.4

Электрическое напряжение. Закон Ома

Вопрос № 1. Работа электрического тока A определяется выражением

$$A = QU,$$

где Q — заряд, переносимый из одной точки в другую; U — напряжение между этими точками.

Полагая в формуле $Q = 1$ Кл, получаем

$$A = U.$$

Поэтому можно сказать, что напряжение равно работе электрического тока при условии, что работа совершена током 1 А в течение 1 с.

Вопрос № 2. Разность потенциалов концов провода равна падению напряжения в проводе, которое определяем по закону Ома:

$$U = IR = 10 \cdot 1 = 10 \text{ В.}$$

Вопрос № 3. Положительные электрические заряды перемещаются от точки с более высоким потенциалом к точке с меньшим потенциалом. В ту же сторону направлен ток. Принимая во внимание, что точка A имеет отрицательный потенциал, замечаем, что потенциал точки B на 15 В выше потенциала точки A .

Вопрос № 4. 1. Определяем напряжение между точками AB :

$$U_{BA} = \varphi_B - \varphi_A = 5 - (-10) = 15 \text{ В.}$$

2. На основании закона Ома находим

$$I = \frac{U_{BA}}{R} = \frac{15}{5} = 3 \text{ А.}$$

Вопрос № 5. Для решения задачи следует обратиться к формуле закона Ома. В соответствии с этой формулой можно применить следующее рассуждение: для того, чтобы в цепи, где действует ЭДС 12 В, протекал ток 1 А, сопротивление цепи должно равняться 12 Ом. Из этих 12 Ом 11,5 Ом приходится на приемник, 0,2 Ом — сопротивление проводов, а оставшиеся 0,3 Ом представляют внутреннее сопротивление источника электрической энергии.

Карточка № 1.5

Связь между ЭДС и напряжением источника. Режимы работы электрической цепи

Вопрос № 1. Для решения задачи можно воспользоваться формулой

$$U = E - IR_0,$$

где U — падение напряжения на зажимах аккумулятора; E — ЭДС аккумулятора; I — разрядный ток; R_0 — внутреннее сопротивление.

Отсюда получаем

$$R_0 = \frac{E - U}{I} = \frac{12 - 11,7}{10} = 0,03 \text{ Ом.}$$

Вопрос № 2. При уменьшении тока в цепи уменьшается падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника. При этом напряжение на зажимах источника увеличивается. Действительно, в формуле

$$U = E - IR_0$$

величины E и R_0 по условию задачи постоянны, а ток I уменьшается. Нетрудно видеть, что при этом U возрастает.

Вопрос № 3. Если внутреннее сопротивление источника уменьшается, то ток в цепи увеличивается. При этом увеличивается и напряжение на зажимках потребителя, равное произведению сопротивления потребителя на ток в цепи.

Действительно, в формуле

$$I = \frac{E}{R_n + R_0}$$

величины ЭДС E и сопротивления нагрузки R_n постоянны, а R_0 уменьшается. Нетрудно видеть, что ток при этом увеличивается, а следовательно, увеличивается и напряжение на зажимах потребителя:

$$U = IR_n.$$

Вопрос № 4. В случае *a* цепь нагрузки разорвана, поэтому вольтметр показывает ЭДС генератора. Действительно, полагая $I = 0$ в формуле $U = E - IR_0$, находим, что $U = E$. В случае *б* вольтметр, подсоединенный параллельно потребителю, показывает напряжение на нагрузке.

Вопрос № 5. Режим короткого замыкания возникает, когда сопротивление внешней цепи уменьшается до нуля. При этом

$$I_{\text{кз}} = \frac{E}{R_0}.$$

Внутреннее сопротивление источника R_0 определяем исходя из данных задачи (см. пояснение к вопросу № 1 карточки № 1.5):

$$R_0 = \frac{E - U}{I} = \frac{12 - 11,8}{10} = 0,02 \text{ Ом.}$$

Таким образом,

$$I_{\text{кз}} = \frac{12}{0,02} = 600 \text{ А.}$$

Ток короткого замыкания значительно превосходит рабочий ток. Если не предусмотреть мер защиты, то обмотка якоря генератора перегреется и генератор будет поврежден. Провод, замыкающий зажимы генератора, может расплавиться и причинить ожоги. Режим короткого замыкания очень опасен и в пожарном отношении. Таким образом, режим короткого замыкания, как правило, является аварийным. Однако в некоторых случаях его используют для получения положительных эффектов (взрыв тонких проволок для получения высоких температур, запальные устройства, электросварка и др.).

Карточка № 1.6

Работа и мощность электрического тока

Вопрос № 1. Предварительно определяем напряжение между точками AB :

$$U = \varphi_B - \varphi_A = 5 - (-10) = 15 \text{ В.}$$

Далее применяем формулу

$$A = QU = 10 \cdot 15 = 150 \text{ Вт} \cdot \text{с.}$$

Вопрос № 2. Работу определяем по формуле

$$A = UQ = UI t = 110 \cdot 10 \cdot 1 = 1100 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{ч.}$$

Здесь t — время, в течение которого совершается работа.

Вопрос № 3. Для рассуждений не пользуемся формулу

$$P = UI.$$

Один из сомножителей увеличился в 2 раза, второй — уменьшился в 2 раза. При этом произведение не изменилось.

Вопрос № 4. Мощность определяем непосредственно по формуле

$$P = UI = 110 \cdot 10 = 1100 \text{ В} \cdot \text{А} = 1100 \text{ Вт.}$$

Вопрос № 5. Мощность — это работа, совершаемая в течение 1 с:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{60} = 60 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 60 \text{ кВт.}$$

Здесь $t = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$ — время, в течение которого генератор выработал $3,6 \cdot 10^6$ джоулей электроэнергии.

Карточка № 1.7

Закон Джоуля — Ленца

Вопрос № 1. Чтобы от исходного выражения перейти к нужному выражению, следует использовать формулу мощности $P = UI$ и закон Ома $U = IR$.

Последовательно получаем

$$A = Pt = UI t = IRIt = I^2 Rt.$$

Вопрос № 2. Воспользуемся равенством $1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}$. Поскольку $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \cdot 3600 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$, то количество эквивалентного тепла определяется произведением

$$Q = 0,24 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ кал} = 864 \text{ ккал}.$$

Вопрос № 3. Электрическая энергия, потребляемая лампой, частично преобразуется в световую и частично — в тепловую энергию. Поскольку коэффициент полезного действия лампы (т. е. отношение энергии, преобразованной в свет, ко всей потребленной энергии) неизвестен, нельзя дать однозначного ответа на этот вопрос.

Вопрос № 4. Для подсчета выделившегося тепла следует воспользоваться непосредственно формулой Джоуля — Ленца

$$Q = 0,24 I^2 Rt = 0,24 \cdot (0,5)^2 \cdot 100 \cdot 60 = 360 \text{ кал}.$$

Вопрос № 5. Для подсчета выделившегося тепла следует воспользоваться непосредственно формулой Джоуля — Ленца:

$$Q = 0,24 I^2 Rt = 0,24 \cdot (10)^2 \cdot 0,01 \cdot 1 = 0,24 \text{ кал}.$$

Карточка № 1.8

Сложная электрическая цепь, основные определения. Первый закон Кирхгофа

Вопрос № 1. Точка, где сходится более двух ветвей, называется узлом. В рассматриваемой цепи (рис. 1) имеются четыре такие точки. Участок цепи между точками разветвления (узлами) представляет собой ветвь. В рассматриваемой цепи шесть ветвей.

Вопрос № 2. Замкнутая фигура, образованная ветвя-

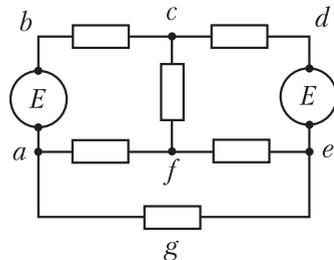


Рис. 1

ми цепи, называется электрическим контуром. В рассматриваемой цепи семь контуров: $abcfa$, $afega$, $cdefc$, $abcdefa$, $abcfeag$, $cdegafc$, $abcdega$ (рис. 1).

Вопрос № 3. Применяем первый закон Кирхгофа:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0.$$

Отсюда находим

$$I_3 = I_2 - I_1 = 2 - (-5) = 7 \text{ А.}$$

Вопрос № 4. Применяем первый закон Кирхгофа, выбрав направление тока I_2 к узлу:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Отсюда находим

$$I_2 = I_1 - I_3 = 5 - 10 = -5 \text{ А.}$$

Ток I_2 получился отрицательным; это означает, что в действительности он направлен не к узлу, как было предположено при записи уравнения, а от узла.

Помимо рассмотренного формального приема, направление тока можно определить следующим рассуждением: с током I_3 каждую секунду к узлу притекает 10 Кл электричества, за то же время 5 Кл утекает от узла с током I_1 , а другие 5 Кл утекают от узла с током I_2 .

Вопрос № 5. Поскольку приборы показывают, что сумма притекающих токов не равна сумме утекающих токов, помимо четырех должны быть еще ветви, благодаря которым выполняется первый закон Кирхгофа.

Таким образом, в узле сходится не менее пять ветвей.

Карточка № 1.9 Второй закон Кирхгофа

Вопрос № 1. Это зависит от выбора направления обхода контуров электрической цепи.

Например, обходя внешний контур по часовой стрелке, запишем

$$E_1 + E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2,$$

а обходя тот же контур в противоположном направлении, получаем

$$-E_1 - E_2 = -I_1 R_1 + I_2 R_2.$$

Вопрос № 2. Для рассматриваемой цепи можно составить три уравнения второго закона Кирхгофа:

$$E_1 = I_1 R_1 - I_3 R_3;$$

$$E_1 + E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2;$$

$$E_2 = -I_2 R_2 + I_3 R_3.$$

Два из этих трех уравнений приведены в первой строке.

Вопрос № 3. Воспользуемся уравнением второго закона Кирхгофа, записанным для левого контура рассматриваемой цепи:

$$E_1 = I_1 R_1 + U_{ab}.$$

Отсюда находим

$$U_{ab} = E_1 - I_1 R_1 = 110 - 10 \cdot 1 = 100 \text{ В.}$$

Вопрос № 4. Воспользуемся уравнением второго закона Кирхгофа, записанным для правого контура данной цепи (контур обходим по часовой стрелке):

$$E_2 = -I_2 R_2 + U_{ba}.$$

Отсюда находим

$$U_{ba} = E_2 + I_2 R_2 = 24 + 6 \cdot 1 = 30 \text{ В.}$$

Напряжение U_{ba} оказалось выше, чем ЭДС E_2 . Это естественно, так как ток I_2 протекает навстречу ЭДС E_2 . Такой режим работы цепи возникает, если выбрать ЭДС E_1 достаточно большой.

Вопрос № 5. Падение напряжения на участке цепи равно алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в рассматриваемый участок:

$$U_{ba} = I_1 R_4 + I_3 R_5 = 5 \cdot 2 + 10 \cdot 3 = 40 \text{ В.}$$

Карточка № 1.10

Эквивалентное преобразование участков цепи, содержащих последовательно и параллельно соединенные сопротивления

Вопрос № 1. Преобразование участка цепи называется эквивалентным, если токи и напряжения в ветвях, не затронутых преобразованием, не изменяются. Так, например, если преобразуется участок схемы (рис. 2), то при всех преобразованиях токи I_a, I_b, I_c, I_d и напряжения $U_{ab}, U_{bc}, U_{cd}, U_{da}$ должны сохраниться неизменными как по величине, так и по направлению. Для этого необходимо, чтобы не изменились сопротивления схемы между точками a, b, c, d , ограничивающими преобразованный участок. Что касается самого преобразованного участка, то его конфигурация, количество ветвей и их сопротивления существенно изменяются, а следовательно, изменяются токи и напряжения внутри преобразованного участка.

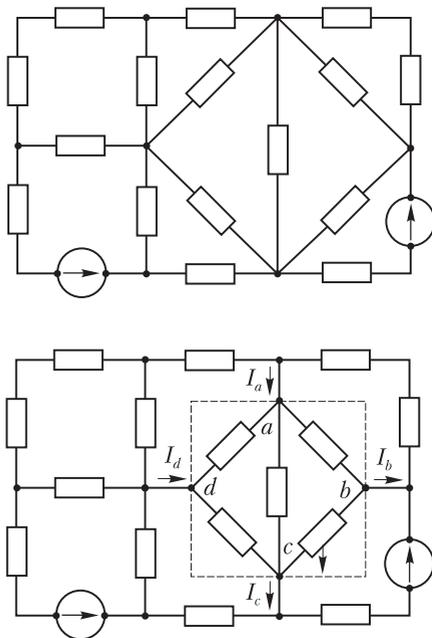


Рис. 2

Вопрос № 2. Задача может быть решена в следующей последовательности.

1. Определяем сопротивление R , эквивалентное трем последовательно соединенным сопротивлениям:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 2 + 4 + 5 = 11 \text{ Ом.}$$

2. Применяя закон Ома, определяем ток в рассматриваемой ветви:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{110}{11} = 10 \text{ А.}$$

3. Применяя закон Ома, находим падение напряжения на отдельных сопротивлениях:

$$U_1 = IR_1 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ В;}$$

$$U_2 = IR_2 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ В;}$$

$$U_3 = IR_3 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ В.}$$

Обратите внимание на следующую закономерность:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}, \frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{R_3} \text{ и т.д.}$$

Вопрос № 3. Для решения задачи следует воспользоваться формулой

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = 0,1 + 0,2 + 0,3 = 0,6 \text{ Ом}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Для решения задачи следует воспользоваться формулой

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2 \cdot 6}{2 + 6} = 1,5 \text{ Ом.}$$

Заметьте, что R всегда меньше меньшего из R_1 и R_2 . Действительно, если $R_1 < R_2$, то

$$R = \frac{R_1}{\frac{R_1}{R_2} + 1},$$

откуда очевидно, что $R < R_1$.

Вопрос № 5. Для решения задачи используем формулы:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 16 \frac{5}{3 + 5} = 10 \text{ А;}$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 16 \frac{3}{3 + 5} = 6 \text{ А.}$$

Обратите внимание на следующую закономерность:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Величины токов, протекающих в параллельно соединенных ветвях, обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей.

Карточка № 1.11
Преобразование треугольника сопротивлений
в эквивалентную звезду сопротивлений и обратное
преобразование звезды в треугольник

Вопрос № 1. Сопротивление между точками *ab* определяем по формуле

$$R_{ab} = \frac{R_2 (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} = \frac{2(1+5)}{2+1+5} = 1,5 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 2. Используем формулы преобразования треугольника в звезду:

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1 \cdot 2}{1+2+5} = 0,25 \text{ Ом};$$

$$R_b = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{2 \cdot 5}{1+2+5} = 1,25 \text{ Ом}.$$

Обратите внимание на то, что сумма сопротивлений $R_a + R_b$ равна найденному ранее сопротивлению R_{ab} .

Вопрос № 3. Используем формулы преобразования треугольника в звезду:

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{1 \cdot 3}{1+2+3} = \frac{1}{2} \text{ Ом};$$

$$R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{1 \cdot 2}{1+2+3} = \frac{1}{3} \text{ Ом};$$

$$R_c = \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{2 \cdot 3}{1+2+3} = 1 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 4. Подставляя в формулы преобразования треугольника в эквивалентную звезду значения $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = R$, находим

$$R_a = R_b = R_c = \frac{R^2}{3R} = \frac{R}{3} = \frac{6}{3} = 2 \text{ Ом.}$$

Вопрос № 5. Используем формулы преобразования звезды в эквивалентный треугольник:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c} = 1 + 2 + \frac{1 \cdot 2}{3} = 3\frac{2}{3} \text{ Ом;}$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a} = 2 + 3 + \frac{2 \cdot 3}{1} = 11 \text{ Ом;}$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b} = 3 + 1 + \frac{3 \cdot 1}{2} = 5\frac{1}{2} \text{ Ом.}$$

Карточка № 1.12

Расчет электрической цепи с одним источником питания

Вопрос № 1. Воспользуйтесь консультацией к вопросу № 3 карточки № 1.11

Вопрос № 2. Цепь содержит последовательно и параллельно соединенные сопротивления. Эквивалентное сопротивление R определяем по формуле

$$R = \frac{(R_1 + R_4)(R_2 + R_5)}{R_1 + R_4 + R_2 + R_5} + R_3 + R_6 =$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}\right)}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{2}{3}} + 1 + 10\frac{1}{2} = 12 \text{ Ом.}$$

Ток I_6 находим по закону Ома:

$$I_6 = \frac{E}{R} = \frac{24}{12} = 2 \text{ А.}$$

Вопрос № 3. Ток I_6 разделяется обратно пропорционально сопротивлениям параллельных ветвей:

$$I_4 = I_6 \frac{R_2 + R_5}{R_1 + R_4 + R_2 + R_5} = 2 \frac{\frac{1}{3} + \frac{2}{3}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{2}{3}} = 1 \text{ A};$$

$$I_5 = I_6 \frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_4 + R_2 + R_5} = 2 \frac{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{2}{3}} = 1 \text{ A}.$$

Вопрос № 4. Падение напряжения на участке электрического контура равно алгебраической сумме падений напряжения на сопротивлениях, входящих в участок:

$$U_{21} = -I_5 R_2 + I_4 R_1 = -1 \cdot \frac{1}{3} + 1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{6} \text{ В};$$

$$U_{32} = I_6 R_3 + I_5 R_2 = 2 \cdot 1 + 1 \cdot \frac{1}{3} = 2\frac{1}{3} \text{ В};$$

$$U_{31} = I_6 R_3 + I_4 R_1 = 2 \cdot 1 + 1 \cdot \frac{1}{2} = 2\frac{1}{2} \text{ В}.$$

Вопрос № 5. Токи, протекающие через сопротивления R_{12} , R_{23} , R_{31} , определяем на основании закона Ома:

$$I_{12} = \frac{U_{21}}{R_{12}} = \frac{\frac{1}{6}}{1} = \frac{1}{6} \text{ A};$$

$$I_{32} = \frac{U_{32}}{R_{23}} = \frac{2\frac{1}{3}}{2} = \frac{7}{6} \text{ A};$$

$$I_{31} = \frac{U_{31}}{R_{31}} = \frac{2\frac{1}{2}}{3} = \frac{5}{6} \text{ A}.$$

Карточка № 1.13

Расчет электрической цепи с несколькими источниками питания методом наложения

Вопрос № 1. Исключая из рассмотрения ЭДС E_2 , получаем электрическую цепь с одним источником ЭДС, изображенную на рис. 3.

Последовательно находим:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + \frac{R \cdot R_2}{R + R_2} = 2 + \frac{2 \cdot 1}{2 + 1} = 2\frac{2}{3} \text{ Ом};$$

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_{\text{экв}}} = \frac{24}{2\frac{2}{3}} = 9 \text{ А.}$$

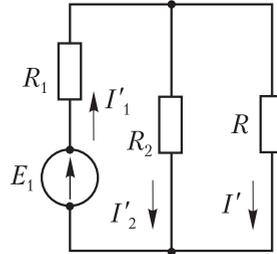


Рис. 3

Вопрос № 2. Ток I'_1 распределяется обратно пропорционально сопротивлениям параллельных ветвей:

$$I'_2 = I'_1 \frac{R}{R + R_2} = 9 \frac{2}{2 + 1} = 6 \text{ А};$$

$$I' = I'_1 \frac{R_2}{R + R_2} = 9 \frac{1}{2 + 1} = 3 \text{ А.}$$

Вопрос № 3. Исключая из рассмотрения ЭДС E_1 получаем электрическую цепь с одним источником ЭДС, изображенную на рис. 4.

Последовательно находим:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + \frac{R \cdot R_2}{R + R_2} = 2 + \frac{2 \cdot 1}{2 + 1} = 2\frac{2}{3} \text{ Ом};$$

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_{\text{экв}}} = \frac{24}{2\frac{2}{3}} = 9 \text{ А.}$$

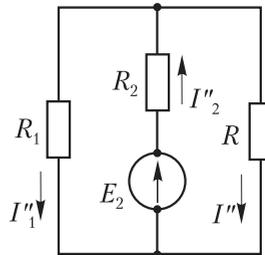


Рис. 4

Вопрос № 4. Ток I''_2 распределяется обратно пропорционально сопротивлениям параллельных ветвей:

$$I_1'' = I_2'' \frac{R}{R + R_1} = 6 \frac{2}{2+2} = 3 \text{ A};$$

$$I'' = I_2'' \frac{R_1}{R + R_1} = 6 \frac{2}{2+2} = 3 \text{ A}.$$

В рассматриваемом случае можно было бы и без вычислений установить, что ток I_2'' поровну распределится между параллельными ветвями, так как $R = R_1$.

Вопрос № 5. Накладывая друг на друга схемы, изображенные на рис. 3 и рис. 4, находим:

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 9 - 3 = 6 \text{ A};$$

$$I_2 = I_2'' - I_2' = 6 - 6 = 0;$$

$$I = I' + I'' = 3 + 3 = 6 \text{ A}.$$

Карточка № 1.14

Порядок расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа

Вопрос № 1. Стрелки, указывающие направление токов в ветвях схемы, расставляются произвольно. В большинстве случаев только в результате расчета можно установить действительные направления токов в ветвях.

Если найденный в результате расчета ток оказался положительным, значит стрелка указывает действительное направление тока. Если найденный в результате расчета ток оказался отрицательным, его действительное направление противоположно указываемому стрелкой.

Вопрос № 2. Независимым называется контур, который содержит хотя бы одну ветвь, не вошедшую в другие выбранные контуры. В рассматриваемой схеме можно выделить только три независимых контура из семи (см. консультацию к вопросу № 2 карточки № 1.8) различных контуров.

Например, это могут быть контуры $acdfa$, $debfd$, $abga$ (рис. 5).

Количество уравнений второго закона Кирхгофа, которое нужно составить для расчета схемы, равно числу независимых контуров.

Вопрос № 3. Количество уравнений первого закона Кирхгофа, которое нужно составить для расчета схемы, равно количеству узлов без одного. В рассматриваемой схеме четыре узла, следовательно, для нее нужно составить три уравнения первого закона Кирхгофа.

Таким образом, первый и второй законы Кирхгофа позволяют составить для рассматриваемой схемы систему из шести независимых линейных уравнений, единственным образом определяющую шесть неизвестных токов, протекающих в шести ветвях схемы.

Вопрос № 4. Согласно стрелке на схеме ток I_6 течет от узла a к узлу b . Найденное в результате расчета значение тока I_6 оказалось отрицательным. Это значит, что в действительности ток течет от узла b к узлу a . Поскольку ток всегда течет от точки с более высоким потенциалом к точке с меньшим потенциалом, то ясно, что точка b имеет более высокий потенциал, чем точка a .

Тот же результат можно получить и формальным путем:

$$\varphi_a = \varphi_b + I_6 R_6 = \varphi_b - 5R_6.$$

Поскольку всегда $R_6 > 0$, то $\varphi_a < \varphi_b$.

Вопрос № 5. Преобразовав треугольник сопротивлений R_4, R_5, R_6 в эквивалентную звезду сопротивлений, получим схему с двумя независимыми контурами и двумя узлами.

Для расчета такой схемы необходимо составить систему из трех уравнений: два — по второму закону Кирхгофа и одно — по первому.

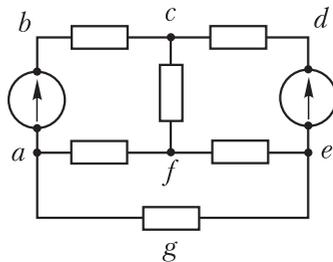


Рис. 5

Карточка № 1.15

Пример расчета электрической цепи методом уравнений Кирхгофа

Вопрос № 1. Сопротивление ветвей эквивалентной звезды определяем по формуле, рассмотренной в консультации к вопросу № 4 карточки № 1.11:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{R_{12}}{3} = \frac{3}{3} = 1 \text{ Ом.}$$

Вопрос № 2. Обходя левый контур по часовой стрелке, а правый — против часовой стрелки, составляем два уравнения второго закона Кирхгофа:

$$E_1 = R_1 I_4 + R_4 I_4 + R_6 I_6 + R_2 I_6;$$

$$E_2 = R_3 I_5 + R_5 I_5 + R_6 I_6 + R_2 I_6.$$

Применяя к верхнему узлу первый закон Кирхгофа, получаем

$$I_4 + I_5 - I_6 = 0.$$

Подставляя заданные числовые значения сопротивлений и ЭДС, записываем систему из трех независимых уравнений, определяющую три неизвестных тока в ветвях:

$$\begin{cases} 2I_4 + 2I_6 = 12; \\ 2I_5 + 2I_6 = 24; \\ I_4 + I_5 - I_6 = 0. \end{cases}$$

Вопрос № 3.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = -12.$$

Вопрос № 4.

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 2 & 12 & 2 \\ 0 & 24 & 2 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} = -72.$$

Вопрос № 5.

$$I_5 = \frac{\Delta_5}{\Delta} = \frac{-72}{-12} = 6 \text{ А.}$$

Карточка № 1.16**Проверка правильности расчета. Баланс мощностей**

Вопрос № 1. Для верхнего узла:

$$I_1 + I_2 - I = 6 + 0 - 6 = 0.$$

Для нижнего узла:

$$-I_1 - I_2 + I = -6 - 0 + 6 = 0.$$

Заметьте, что оба уравнения одинаковы, поэтому в систему уравнений для расчета схемы войдет только одно из них в соответствии с правилом: «количество уравнений первого закона Кирхгофа равно числу узлов без одного».

Вопрос № 2. Проверяем выполнение второго закона Кирхгофа только для независимых контуров, например для левого и правого:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2; \quad 24 - 12 = 6 \cdot 2;$$

$$E_2 = I_2 R_2 + IR; \quad 12 = 6 \cdot 2.$$

Если для всех независимых контуров схемы второй закон Кирхгофа выполняется, то он автоматически выполняется и для других контуров этой схемы.

Вопрос № 3. Мощность, отдаваемая источниками, определяется из выражения

$$P = E_1 I_1 + E_2 I_2 = 24 \cdot 6 = 144 \text{ Вт}.$$

Вопрос № 4. Мощность, потребляемая в цепи, определяется как сумма мощностей отдельных потребителей:

$$P' = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 6^2 \cdot 2 + 6^2 \cdot 2 = 144 \text{ Вт}.$$

Вопрос № 5. Для ответа на поставленный вопрос проверяем баланс мощностей:

$$P = 144 \text{ Вт}; \quad P' = 144 \text{ Вт}; \quad P = P'.$$

Расчет произведен правильно.

Карточка № 1.17

Линейные и нелинейные электрические цепи

Вопрос № 1. Вольт-амперная характеристика показывает зависимость между током, протекающим через сопротивление, и падением напряжения на сопротивлении.

Такая зависимость изображена на верхнем рисунке.

Вопрос № 2. Вольт-амперная характеристика линейного элемента имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат. Этому условию удовлетворяет только прямая 2.

Вопрос № 3. Сопротивление линейного элемента не зависит от тока. Этому условию удовлетворяет только прямая 1.

Вопрос № 4. Точное значение сопротивления определяется из выражения

$$R = \frac{du}{di}.$$

Напряжение как функция тока задано графически, поэтому для определения сопротивления нелинейного элемента при токе 1,5 А нужно выполнить графическое дифференцирование.

Можно поступить следующим образом: в окрестностях точки, соответствующей току $I = 1,5$ А, выбрать интервал изменений тока, например $\Delta I = 1$ А (от $I = 1$ А до $I = 2$ А) и определить соответствующее увеличение напряжения $\Delta U = 10$ В (от $U = 10$ В до $U = 20$ В). Далее находим

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{10}{1} = 10 \text{ Ом.}$$

Вопрос № 5. У линейного элемента равным приращениям тока соответствуют равные приращения напряжения.

Таблица показывает, что для рассматриваемого участка цепи эта закономерность не соблюдается, следовательно участок содержит нелинейный элемент.

Карточка № 1.18

Расчет простейших цепей с нелинейными сопротивлениями

Вопрос № 1. Для определения тока в цепи используем вольт-амперную характеристику. Устанавливаем, что при $E = 40$ В ток в цепи $I = 2$ А.

Для определения падения напряжения на сопротивлении R_0 используем вольт-амперную характеристику. Установив, что при токе $I = 2$ А на сопротивлении R_0 падает напряжение 10 В.

Вопрос № 2. Для построения вольт-амперной характеристики участка AB , содержащего два последовательно соединенных нелинейных сопротивления, надо складывать падения напряжения, соответствующие одному и тому же току, т.е. складывать ординаты данных характеристик, соответствующие одним и тем же абсциссам.

Вопрос № 3. Для построения вольт-амперной характеристики участка AB , содержащего два параллельно соединенных нелинейных сопротивления, надо складывать токи, соответствующие одному и тому же напряжению, т.е. складывать абсциссы данных характеристик, соответствующие одним и тем же ординатам.

Вопрос № 4. Потому что напряжение между точками A , B равно сумме падений напряжения на $HC1$ и $HC2$.

Вопрос № 5. Потому что в неразветвленной части цепи ток равен сумме токов, протекающих через $HC1$ и $HC2$.

К главе 2

Карточка № 2.1

Магнитное поле. Магнитная индукция

Вопрос № 1. Чтобы установить наличие магнитного поля, необходимо провести опыт в «пустоте». Наличие механической силы, действующей на проводник с током при отсутствии среды в виде известных частиц, подтверждает существование магнитного поля.

Отсюда следует также, что пустоты как некоей абстрактной протяженности не существует.

Вопрос № 2. Скорость распространения электромагнитного поля в вакууме равна скорости света

$$3 \cdot 10^5 \text{ км/с} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}.$$

Вопрос № 3. В общем случае для криволинейного проводника, ось которого меняет свое направление при переходе от одного элемента проводника к другому, закон Ампера следует записывать в виде

$$dF = IBdl \sin \alpha,$$

где B и α зависят от выбора элемента dl .

Если ось проводника составляет с вектором B угол α , то запись закона Ампера принимает вид

$$F = I B \sin \alpha.$$

При положении проводника перпендикулярно вектору магнитной индукции ($\alpha = 90^\circ$; $\sin \alpha = 1$) последнее выражение еще упрощается:

$$F = IB.$$

Вопрос № 4. Общепринятое обозначение магнитной индукции B . Магнитная индукция измеряется в веберах, де-

ленных на метры квадратные. Вебером называется единица с размерностью $\text{В} \cdot \text{с}$.

Вопрос № 5. Чтобы решить задачу, нужно вспомнить, что в практической рационализированной системе единиц длина измеряется в метрах, ток в амперах, магнитная индукция в $\text{Вб}/\text{м}^2$, сила в ньютонах.

Подставив в формулу закона Ампера заданные значения величин, устанавливаем, что должна получиться единица силы, т.е. один ньютон.

Карточка № 2.2

Магнитный поток. Закон Био – Савара

Вопрос № 1. В общем случае, когда криволинейная поверхность находится в неоднородном магнитном поле, магнитный поток определяется по формуле

$$\Phi = \int_S \overline{BdS}.$$

В том случае, когда площадка перпендикулярна силовым линиям однородного магнитного поля, формула принимает наиболее простой вид

$$\Phi = BS.$$

Вопрос № 2. В практической рационализированной системе единиц измерения магнитный поток измеряется в веберах или вольт-секундах.

Вопрос № 3. Закон Био – Савара определяет зависимость магнитной индукции от тока, создающего магнитное поле.

Вопрос № 4. Магнитная индукция в точке A создается не элементом проводника dl , а всем проводником, по которому течет ток. Поэтому изменение положения элемента dl на проводнике скажется на величине элементарной индукции dB , создаваемой элементом dl , но не на индукции B , создаваемой всем проводником.

Если изменить положение точки A , то индукция в этой точке изменится, поскольку изменяются условия эксперимента.

При удалении точки A от проводника магнитное поле ослабевает, индукция в точке A уменьшается; при приближении точки A к проводнику магнитная индукция возрастает.

Независимость индукции в точке A от выбора элемента $d\mathbf{l}$ на проводнике следует также из формальных рассуждений: после интегрирования $d\mathbf{l}$ будет исключено из выражения, определяющего величину индукции в точке A .

Вопрос № 5. Как следует из закона Био – Савара, увеличение тока в проводнике вызывает пропорциональное увеличение элементарной индукции, создаваемой каждым элементом $d\mathbf{l}$ проводника, а следовательно, и пропорциональное увеличение магнитной индукции, создаваемой всем проводником.

Таким образом, увеличение тока в проводнике в 3 раза вызовет увеличение в 3 раза магнитной индукции во всех точках окружающего пространства.

Карточка № 2.3

Магнитная проницаемость. Диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные вещества

Вопрос № 1. Магнитная проницаемость характеризует воздействие среды на величину магнитной индукции, создаваемой током. Магнитная проницаемость диамагнитных и парамагнитных веществ мало отличается от магнитной проницаемости пустоты. Это означает, что диамагнитные и парамагнитные вещества почти не влияют на величину магнитной индукции. Ферромагнитные вещества могут усиливать магнитную индукцию поля, создаваемого током, в десятки тысяч и сотни тысяч раз.

Вопрос № 2. Магнитная постоянная характеризует магнитные свойства пустоты.

Вопрос № 3. Характерным признаком ферромагнитных веществ является не только большая величина магнитной проницаемости, но и зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Последнее свойство ферромагнитных веществ используется в магнитных усилителях.

Вопрос № 4. Воздух, алюминий, марганец являются парамагнитными веществами.

Вопрос № 5. Относительная магнитная проницаемость пустоты равна единице.

Карточка № 2.4

Напряженность магнитного поля. Закон полного тока

Вопрос № 1. Напряженность магнитного поля в пустоте может быть найдена как отношение магнитной индукции к абсолютной магнитной проницаемости пустоты:

$$H = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}}.$$

Вопрос № 2. В каждой точке рассматриваемой окружности вектор напряженности магнитного поля направлен по касательной. Таким образом, направление вектора меняется от точки к точке, следовательно, вектор напряженности магнитного поля зависит от положения элемента.

Величина (модуль) вектора напряженности магнитного поля во всех точках окружности одна и та же, следовательно, модуль вектора не зависит от положения элемента на окружности.

Вопрос № 3. Полным током называется алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром.

Вопрос № 4. Длина окружности увеличивается, а напряженность магнитного поля в точках, лежащих на окружности, уменьшается, как это очевидно из формулы

$$H = \frac{I}{l}.$$

Вопрос № 5. Полный ток равен алгебраической сумме рассматриваемых токов.

Карточка № 2.5

Магнитное поле тороида

Вопрос № 1. Поверхность, ограниченная внутренней окружностью, не пронизывается токами, поэтому полный ток равен нулю.

Поверхность, ограниченная внешней окружностью, пронизывается токами в одном направлении столько же раз, сколько в противоположном направлении, поэтому полный ток также равен нулю.

Поверхность, ограниченная средней окружностью, пронизывается токами в одном направлении столько раз, сколько витков имеет обмотка тороида.

Вопрос № 2. При увеличении длины тороида напряженность магнитного поля в сердечнике уменьшается, как это очевидно из формулы

$$H = \frac{\omega I}{l}.$$

Вопрос № 3. При увеличении длины тороида напряженность магнитного поля в сердечнике уменьшается (см. ответ на вопрос № 2 этой же карточки); следовательно, уменьшается магнитная индукция в сердечнике и магнитный поток.

Вопрос № 4. При введении стального сердечника магнитная индукция внутри катушки увеличивается.

Вопрос № 5. Длинной называется катушка, длина которой значительно превышает диаметр.

Карточка № 2.6

Закон электромагнитной индукции

Вопрос № 1. Если контур перемещается параллельно самому себе в равномерном магнитном поле, в нем не будет наводиться ЭДС, так как не будет меняться магнитный поток, пронизывающий контур.

Для того чтобы в контуре наводилась ЭДС, необходимо, чтобы магнитный поток, связанный с контуром, изменялся. Величина ЭДС пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Вопрос № 2. Индуцируемая в контуре ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур.

Вопрос № 3. В условии задачи сказано, что магнитный поток увеличивался равномерно. Это означает, что скорость изменения магнитного потока была постоянной, а следовательно, постоянной была и ЭДС, индуцируемая в контуре. Величина ЭДС определяется по формуле

$$|e| = \omega \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 10 \cdot \frac{5}{2} = 25 \text{ В.}$$

Вопрос № 4. Потокосцепления контура равны сумме магнитных потоков, пронизывающих витки контура; если все витки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, то сумму магнитных потоков можно заменить произведением магнитного потока на число витков. Таким образом, потокосцепления контура равны 10 В·с или 10 Вб.

Вопрос № 5. ЭДС равна скорости изменения потокосцеплений, т.е. 10 В.

Карточка № 2.7

Движение прямолинейного проводника в магнитном поле. Принцип Ленца

Вопрос № 1. Сплошной контур пронизывают четыре магнитные силовые линии. Контур, изображенный пунктиром, — 12.

Вопрос № 2. При перемещении вольтметра магнитный поток, пронизывающий контур, не изменяется. Следовательно, в контуре не будет наводиться никакой ЭДС.

Вопрос № 3. Величину индуктированной ЭДС определяем по формуле

$$E = Blv = 1 \text{ В.}$$

Вопрос № 4. Направление индуктированной ЭДС и тока определяется правилом правой руки.

Вопрос № 5. Индуктированный ток стремится устранить причину, его вызывающую.

Карточка № 2.8

Явление самоиндукции. Индуктивность

Вопрос № 1. Изменился ток в контуре, изменился магнитный поток, создаваемый этим током, изменилось потокосцепление контура, возникла ЭДС самоиндукции.

Вопрос № 2. Этой буквой принято обозначать индуктивность контура.

Вопрос № 3. Потокосцепления контура прямо пропорциональны току, следовательно, изменяются при изменении тока.

Индуктивность контура определяется его конфигурацией и размерами, количеством витков и магнитной проницаемостью среды. Для определенного конкретного контура это величина постоянная, не зависящая от тока и потоко- сцеплений контура.

Вопрос № 4. Индуктивность катушки равна отношению потоко-сцеплений контура к току, протекающему по нему:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\omega\Phi}{I} = \frac{100 \cdot 0,001}{1} = 0,1 \text{ Гн.}$$

Вопрос № 5. ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока

$$e = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -1 \cdot \frac{1}{0,1} = -10 \text{ В.}$$

Карточка № 2.9 Индуктивность тороида

Вопрос № 1. Магнитная индукция в сердечнике тороида пропорциональна количеству витков и току обмотки, магнитной проницаемости материала сердечника и обратно пропорциональна длине тороида.

Вопрос № 2. Индуктивность катушки пропорциональна квадрату числа витков:

$$L = \frac{\mu\omega^2 S}{l}.$$

Если количество витков увеличивается в 2 раза, индуктивность катушки увеличивается в 4 раза.

Вопрос № 3. Индуктивность катушки прямо пропорциональна магнитной проницаемости сердечника. При введении в катушку сердечника с большой магнитной проницаемостью индуктивность катушки увеличивается.

Вопрос № 4. Индуктивность катушки определяется ее размерами, количеством витков и магнитной проницаемостью сердечника. Поскольку магнитная проницаемость воздуха величина постоянная, то и индуктивность катушки с воздушным сердечником остается постоянной при любых изменениях потоко-сцеплений.

Вопрос № 5. Подставляя в формулу для индуктивности катушки заданные числовые значения, находим

$$L = \frac{\mu w^2 S}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000^2 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-2}} = 10^{-2} \text{ Гн.}$$

Карточка № 2.10 Явление взаимной индукции

Вопрос № 1. Если токи в магнитнодсвязанных контурах изменяются, в каждом контуре одновременно будут наводиться ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции.

Вопрос № 2. Изменился ток в контуре, изменился магнитный поток, изменились потокосцепления соседнего контура, возникла ЭДС взаимной индукции. Таким образом, причиной, вызывающей все другие следствия, является изменение тока в соседнем контуре.

Вопрос № 3. Этой буквой принято обозначать взаимную индуктивность.

Вопрос № 4. Поскольку неизвестно время, в течение которого увеличивался ток, нельзя определить скорость изменения тока, а следовательно, и взаимную индуктивность контура.

Если бы скорость изменения тока была известна, индуктивность можно определить из выражения

$$|e| = M \frac{di}{dt}.$$

Вопрос № 5. Взаимную индуктивность определяем по формуле

$$M = \frac{\Psi_{12}}{I_2} = \frac{0,1}{0,1} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с} = 1 \text{ Гн.}$$

Карточка № 2.11 Ферромагнетизм

Вопрос № 1. Во всех перечисленных областях техники широко используются ферромагнитные материалы.

Вопрос № 2. Аналитическое выражение зависимости индукции от напряженности магнитного поля в принципе

возможно с любой степенью точности, но оно оказывается громоздким. Для расчетов удобнее пользоваться графиком.

Вопрос № 3. Потери на гистерезис пропорциональны площади фигуры, ограниченной петлей гистерезиса.

Вопрос № 4. Потери на гистерезис выражают энергию, затрачиваемую на изменение ориентации элементарных магнитных областей, называемых доменами.

Вопрос № 5. Для магнитопроводов применяются материалы с узкой петлей гистерезиса, у которых потери на перемагничивание невелики.

Для постоянных магнитов выбираются материалы с широкой петлей гистерезиса, обладающие большой остаточной магнитной индукцией и коэрцитивной силой.

Карточка № 2.12

Магнитная цепь. Ферромагнитные материалы

Вопрос № 1. Магнитопровод часто содержит немагнитные участки, в том числе воздушные зазоры, отделяющие подвижную часть магнитопровода от неподвижной, что требуется, например, в электрических машинах; у электрических приборов в воздушных зазорах помещаются рамки, через обмотки которых протекает ток, взаимодействующий с магнитным полем.

Вопрос № 2. Приведенное утверждение аналогично первому закону Кирхгофа: сумма токов, притекающих к узлу, равна сумме токов, утекающих от узла.

Вопрос № 3. Магнитный поток Φ_2 равен разности магнитных потоков Φ и Φ_1 .

Вопрос № 4. Вольфрамная сталь, альнико, платино-кобальтовый сплав.

Вопрос № 5. При частотах переменного тока, достигающих миллионов герц, удовлетворительно работают ферриты.

К главе 3

Карточка № 3.1 Переменный ток

Вопрос № 1. Одно из важнейших достоинств переменного тока по сравнению с постоянным током заключается в возможности изменять величину напряжения и тока с помощью такого простого, надежного и экономичного устройства, как трансформатор.

Передавать электрическую энергию на дальние расстояния можно по линиям переменного и постоянного токов (в последнем случае для повышения напряжения требуются сравнительно сложные электрические схемы). Преобразование электрической энергии в другие виды достаточно просто осуществляется как в цепях переменного, так и в цепях постоянного тока.

Вопрос № 2. Тепловые потери в линии электропередачи пропорциональны квадрату силы тока. Поэтому при передаче электроэнергии стремятся уменьшить силу тока. Чтобы при этом не снижалась передаваемая мощность, необходимо соответственно увеличивать величину напряжения.

Потребление электроэнергии производится при низком напряжении, чем обеспечивается безопасность обслуживающего персонала и резко снижаются размеры и стоимость изоляционных деталей.

Вопрос № 3. Понижающие трансформаторы на приемном конце линии электропередачи уменьшают величину напряжения до значений, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала и бытовых потребителей.

Вопрос № 4. Тепловые потери пропорциональны квадрату силы тока (закон Джоуля – Ленца). Поэтому при увеличении тока в 2 раза потери увеличиваются в 4 раза.

Вопрос № 5. При увеличении напряжения в 10 раз величина тока уменьшается в 10 раз, если передаваемая мощность не изменяется. Потери в линии на тепло пропорцио-

нальны квадрату тока. Следовательно, в случае *б* тепловые потери в 100 раз меньше, чем в случае *а*.

Карточка № 3.2

Основные характеристики переменного тока

Вопрос № 1. Непосредственно из графика, приведенного в задании, находим

$$\text{при } t = \frac{T}{4} \quad i = I_m, \quad \text{при } t = \frac{T}{2} \quad i = 0.$$

Нетрудно найти значения тока и напряжения в другие моменты времени, например, при $t = \frac{3T}{4} \quad i = -I_m$.

Вопрос № 2. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с.}$$

Вопрос № 3. Частота показывает, сколько полных циклов изменения тока происходит в течение одной секунды. Поэтому

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Гц.}$$

Угловая частота определяется по формуле

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Для ответа на вопрос следует заданную формулу

$$i = 0,5 \sin \omega t$$

сравнить с общей формулой синусоидального тока

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

Сравнивая, находим

$$\psi = 0; \quad \omega = 1 \text{ с}^{-1}; \quad I_m = 0,5 \text{ А.}$$

Таким образом, амплитуда тока равна 0,5 А, угловая частота равна 1 с⁻¹.

Вопрос № 5. Аргумент синуса называют фазой, следовательно, фазой рассматриваемого тока является выражение $\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$.

Значение фазы при $t = 0$ называют начальной фазой. В рассматриваемом случае начальная фаза равна $-\frac{\pi}{2} = -90^\circ$.

Карточка № 3.3 ЭДС и напряжение в цепи переменного тока

Вопрос № 1. Для ответа на вопрос следует заданную формулу

$$e = 100 \sin \omega t$$

сравнить с общей формулой синусоидальной ЭДС

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e).$$

Сравнивая, находим $E_m = 100$ В; $\psi_e = 0$.

Таким образом, амплитуда ЭДС равна 100 В, начальная фаза равна 0.

Вопрос № 2. Прежде чем определить начальную фазу, выразим заданное напряжение через синусоидальную функцию времени:

$$u = U_m \cos \omega t = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Сравнивая полученную формулу с общей формулой синусоидального напряжения

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

находим $\psi_u = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$.

Таким образом, начальная фаза рассматриваемого напряжения равна 90° .

Вопрос № 3. В рассматриваемой формуле коэффициент при t является угловой частотой ЭДС $\omega = 314$ с⁻¹.

Частота тока, напряжения и ЭДС связаны с угловой частотой простым соотношением

$$\omega = 2\pi f,$$

откуда

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2\pi} = 50 \text{ Гц.}$$

Вопрос № 4. Сдвиг по фазе равен разности фаз (или начальных фаз) рассматриваемых ЭДС:

$$\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \pi = 180^\circ.$$

Вопрос № 5. Сдвиг по фазе равен разности начальных фаз рассматриваемых напряжений. Начальная фаза ψ_1 напряжения u_1 равна 90° (см. ответ на вопрос № 2 этой карточки). Начальная фаза ψ_2 напряжения u_2 равна нулю (ср. с ответом на вопрос № 1). Таким образом,

$$\psi_1 - \psi_2 = 90^\circ.$$

Карточка № 3.4

Получение переменной электродвижущей силы

Вопрос № 1. Для определения ЭДС следует воспользоваться законом электромагнитной индукции

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \frac{d}{dt}(\Phi_m \cos \omega t) = \omega \Phi_m \omega \sin \omega t.$$

Вопрос № 2. Проекция отрезка a , образующего с горизонтальной плоскостью угол α , равна $a \cdot \cos \alpha$.

Вопрос № 3. Магнитный поток по определению равен произведению магнитной индукции на площадку, перпендикулярную силовым линиям поля, следовательно,

$$\Phi = BS' = BS \cos \omega t.$$

Вопрос № 4. После указанной замены выражение для магнитного потока приобретает вид

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t.$$

Подставляя этот магнитный поток в формулу закона электромагнитной индукции, получаем

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \omega \sin \omega t.$$

Вопрос № 5. Выражение ЭДС, найденное в ответе на предыдущий вопрос, можно записать следующим образом:

$$e = \omega \Phi_m \omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t,$$

где $E_m = \omega \Phi_m \omega$ — амплитуда ЭДС.

Поскольку $\Phi_m = BS$, то

$$E_m = \omega SB\omega.$$

Отсюда очевидно, что при увеличении индукции B в 2 раза и точно таком же уменьшении скорости вращения рамки ω амплитуда ЭДС, наводимой в рамке, не изменится.

Карточка № 3.5

Принцип действия генератора переменного тока

Вопрос № 1. Закон электромагнитной индукции выражается в двух формулировках: 1) индуктируемая ЭДС пропорциональна магнитной индукции B , активной длине проводника l и скорости пересечения силовых линий

$$e = Blv$$

(формулировка Фарадея);

2) индуктируемая ЭДС пропорциональна скорости изменения потокосцеплений контура:

$$e = \frac{d\psi}{dt}$$

(формулировка Максвелла).

Обе эти формулировки взаимосвязаны и выводятся одна из другой. Формулировка Фарадея удобна, когда рассматривается движение проводника в магнитном поле,

формулировка Максвелла применяется при рассмотрении контура, который пронизывается переменным магнитным потоком (например, обмотка трансформатора).

Вопрос № 2. Линейная скорость точки A пропорциональна угловой скорости вращения отрезка и расстоянию от точки A до центра вращения:

$$v = \omega \frac{a}{2}.$$

Вопрос № 3. Стороны a рамки не пересекают магнитных силовых линий, поэтому при определении активной длины проводника необходимо учитывать только две стороны b . Следовательно, $l = 2b\omega$.

Вопрос № 4. Произведя указанные подстановки, найдем

$$e = Blv = B \cdot 2b\omega \cdot \frac{\omega a}{2} = Bab\omega^2 = BS\omega^2.$$

Вопрос № 5. При выполнении предыдущего задания мы получили, что ЭДС, индуцируемая в обмотке генератора, определяется выражением

$$e = BS\omega^2.$$

Подставляя сюда заданный закон изменения B , получаем

$$e = B_m S\omega^2 \sin \omega t = \Phi_m \omega^2 \sin \omega t,$$

или

$$e = E_m \sin \omega t.$$

Следовательно, ЭДС, индуцируемая в обмотке генератора, изменяется по синусоидальному закону.

Карточка № 3.6

Положение витка в магнитном поле и фаза переменной ЭДС

Вопрос № 1. В тот момент времени, когда в рамке наводится максимальная ЭДС, стороны рамки находятся под центрами полюсов, где магнитная индукция максимальна.

При этом плоскость рамки параллельна линии, соединяющей середины полюсов.

Вопрос № 2. В тот момент времени, когда наводимая в рамке ЭДС равна нулю, стороны рамки располагаются между полюсами, где магнитная индукция равна нулю. При этом плоскость рамки перпендикулярна линии, соединяющей середины полюсов.

Вопрос № 3. ЭДС, индуктируемая в рамке, определяется выражением

$$e = E_m \sin \omega t = E_m \sin \alpha,$$

где α — угол, под которым плоскость рамки наклонена к нейтрали (линии, проходящей через точки с нулевой магнитной индукцией). Угол α является фазой индуктируемой ЭДС. Значение α при t , равном нулю, представляет собой начальную фазу ЭДС.

По условию задачи при $t = 0$

$$e = E_m \sin \alpha = 0.$$

Отсюда находим, что $\alpha = 0$.

Следовательно, начальная фаза индуктируемой ЭДС равна нулю.

Вопрос № 4. Фаза индуктируемой ЭДС определяется выражением

$$\alpha = \omega t + \psi_e,$$

из которого очевидно, что она прямо пропорциональна скорости вращения рамки.

Вопрос № 5. Начальная фаза индуктируемой ЭДС не зависит от скорости вращения рамки. Значение начальной фазы определяется только положением рамки в магнитном поле машины при $t = 0$.

Карточка № 3.7

Способы графического изображения синусоидальных величин

Вопрос № 1. В общем случае выражение синусоидального тока имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Подставляя сюда заданные значения I_m и ψ_i , находим

$$i = 2 \sin(\omega t - 90^\circ).$$

В начальный момент времени, при $t = 0$ $i(0) = 2 \sin(-90^\circ) = -2$ А.

Этому условию удовлетворяет только нижний график.

Вопрос № 2. Сравнивая с периодом синусоиды деления, отложенные на графике по горизонтальной оси, находим, что одно деление соответствует 45° . Следовательно,

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 2 \sin(\omega t + 45^\circ).$$

Для проверки найдем из полученной формулы значение тока в начальный момент времени; имеем

$$\text{при } t = 0 \quad i(0) = 2 \sin 45^\circ = \sqrt{2} = 1,41,$$

что согласуется с рассматриваемым графиком.

Вопрос № 3. Сравнивая с периодом синусоиды деления отложенные на графике по горизонтальной оси, находим, что одно деление соответствует 45° . Следовательно,

$$u = 200 \sin(\omega t - 45^\circ).$$

Для проверки найдем из полученной формулы значение напряжения в начальный момент времени; имеем

$$\text{при } t = 0 \quad u(0) = 200 \sin(-45^\circ) = -100\sqrt{2} = -141 \text{ В},$$

что согласуется с рассматриваемым графиком.

Вопрос № 4. Полагая в заданном выражении тока $t = 0$, находим

$$i(0) = 2 \sin 30^\circ = 1 \text{ А}.$$

Вопрос № 5. Вначале положим в заданном выражении тока $t = 0$. Получим

$$i(0) = 2 \sin 30^\circ = 1 \text{ А}.$$

По истечении периода (как и любого целого числа периодов) это значение тока повторяется:

$$i(T) = i(2T) = i(3T) = \dots = i(0) = 1 \text{ А.}$$

Карточка № 3.8 Векторная диаграмма

Вопрос № 1. По определению вектор наклонен к горизонтальной оси под углом, равным начальной фазе изображаемого тока. Следовательно, $\psi_i = 45^\circ$, а выражение тока имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t + 45^\circ).$$

Вопрос № 2. По определению вектор наклонен к горизонтальной оси под углом, равным начальной фазе изображаемого тока. Следовательно $\psi_i = -30^\circ$ (угол, отсчитанный по часовой стрелке, считается отрицательным).

Принимая во внимание заданное значение амплитуды тока, записываем

$$i = 2 \sin(\omega t - 30^\circ).$$

Вопрос № 3. Выражение для тока, изображаемого этим вектором, имеет вид

$$i = 3 \sin(\omega t - 30^\circ).$$

(сравните с ответом на предыдущий вопрос).

Полагая $t = 0$, находим

$$i(0) = 3 \sin(-30^\circ) = -3 \sin 30^\circ = -1,5 \text{ А.}$$

Вопрос № 4. По определению для построения синусоиды, изображаемой вектором, берутся проекции вектора на вертикальную ось, соответствующие различным значениям времени. Для установления соответствия между вектором и синусоидой удобно рассматривать момент времени $t = 0$. Из графика находим, что при $t = 0$ $i = 0$. Нулевую проекцию

на вертикальную ось при $t = 0$ дает вектор, расположенный вдоль горизонтальной оси (вторая строка ответов).

Вопрос № 5. Из векторной диаграммы очевидно, что ток отстает от напряжения по фазе на угол 30° . Поэтому выражение для тока имеет вид

$$i = I_m \sin(\omega t - 30^\circ).$$

Карточка № 3.9

Сложение и вычитание синусоидальных величин

Вопрос № 1. Амплитуда искомого тока равна модулю вектора, представляющего собой сумму заданных векторов. Модуль суммарного вектора определяем по теореме Пифагора:

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ А.}$$

Вопрос № 2. Прежде всего определяем сдвиг по фазе между токами i_1 и i_2 :

$$(\omega t + 45^\circ) - (\omega t - 45^\circ) = 90^\circ.$$

Таким образом, на векторной диаграмме векторы $I_{1m} = 4$ и $I_{2m} = 3$ расположены под углом 90° . Амплитуда тока i равна модулю суммарного вектора (сравните с ответом на предыдущий вопрос):

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ А.}$$

Вопрос № 3. Вектор I_m , изображающий ток i , находим как сумму векторов I_{1m} и I_{2m} . Модуль этого вектора

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2} = \sqrt{5^2 + 5^2} = 5\sqrt{2} \text{ А.}$$

Построение показывает, что вектор I_m опережает вектор I_{2m} на угол 45° , соответственно ток i опережает по фазе ток i_2 на 45° . Следовательно, выражение для тока i имеет вид

$$i = 5\sqrt{2} \sin(\omega t + 45^\circ).$$

Вопрос № 4. Произведя построение, аналогичное рассмотренному в ответе на предыдущий вопрос, найдем, что вектор I_m , изображающий суммарный ток i , имеет модуль, равный $5\sqrt{2}$, и повернут относительно вектора I_{1m} на 45° по часовой стрелке, а относительно вектора I_{2m} — на 45° против часовой стрелки. Следовательно, ток i отстает от тока i_1 по фазе на 45° и опережает ток i_2 по фазе на 45° :

$$i = 5\sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ).$$

Вопрос № 5. Рассуждая так же, как при ответе на предыдущий вопрос, находим

$$u = 8\sqrt{2} \sin \omega t.$$

Карточка № 3.10

Среднее значение переменного тока

Вопрос № 1. При частоте тока 50 Гц в одной секунде укладывается целое число периодов тока (50).

Среднее значение тока за целое число периодов равно нулю.

Вопрос № 2. Для подсчета среднего значения тока необходимо знать его аналитическое выражение или график. Ни то ни другое нам не задано полностью, так как неизвестна амплитуда тока.

Вопрос № 3. Высота рассматриваемого прямоугольника равна среднему значению тока.

Вопрос № 4. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} I_m.$$

В рассматриваемом случае $I_m = 3,14 = \pi$.

Следовательно, $I_{\text{ср}} = 2$ А.

Вопрос № 5. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$U_{\text{cp}} = \frac{2}{\pi} U_m.$$

В рассматриваемом случае $U_m = 314 = 100\pi$.
Следовательно, $U_{\text{cp}} = 200$ В.

Карточка № 3.11

Действующее значение переменного тока

Вопрос № 1. Действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который в равных условиях выделяет столько же тепла, сколько переменный ток.

По условию задачи переменный ток выделяет столько тепла, сколько постоянный ток силой 5 А. Следовательно, действующее значение переменного тока равно 5 А.

Вопрос № 2. Чтобы в равных условиях довести до кипения 4 л воды, потребуется тепла в 4 раза больше, чем для 1 л. Количество выделяемого тепла пропорционально квадрату силы тока. Чтобы количество выделяемого тепла увеличилось в 4 раза, сила тока должна увеличиться в 2 раза.

Следовательно, необходимая для нагрева 4 л воды сила постоянного тока равна 10 А.

Соответственно и действующее значение переменного тока равно 10 А.

Вопрос № 3. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Максимальное значение тока $I_m = 100$ А.

Следовательно,

$$I = \frac{100}{\sqrt{2}} = 70,7 \text{ А.}$$

Вопрос № 4. Амплитудное значение напряжения находим по формуле

$$U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 100 = 141 \text{ В.}$$

Вопрос № 5. Синусоидальный ток однозначно определяется тремя основными величинами: амплитудой, угловой

частотой и начальной фазой. Если эти величины известны, то может быть построен график тока и записано его аналитическое выражение. Угловая частота ω и начальная фаза тока ψ_i заданы. Амплитудное значение тока находим по формуле

$$I_m = \sqrt{2}I = \sqrt{2} \cdot 10 = 14,1 \text{ A.}$$

Выражение, удовлетворяющее этим данным, имеет вид:

$$i = 14,1 \sin(314t + 45^\circ).$$

Карточка № 3.12

Коэффициент формы кривой. Коэффициент амплитуды

Вопрос № 1. Для сетей переменного тока указывается действующее значение напряжения. Максимальное напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся к клеммам сети, будет в $\sqrt{2}$ раз больше:

$$U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 200 = 310 \text{ В.}$$

Вопрос № 2. Конденсатор, подсоединенный к линии переменного тока напряжением $U = 127 \text{ В}$, в некоторые моменты времени окажется под напряжением

$$U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 127 = 179 \text{ В.}$$

Ясно, что указанный в задаче конденсатор подсоединять к линии нельзя: он будет пробит.

Вопрос № 3. Амперметр измеряет действующее значение тока, следовательно, $I = 1,11 \text{ A}$.

Коэффициент формы кривой тока определяем по формуле

$$K_\Phi = \frac{I}{I_{\text{cp}}} = \frac{1,11}{1} = 1,11.$$

Очевидно, что кривая тока имеет синусоидальную форму.

Вопрос № 4. Коэффициент амплитуды для синусоидального напряжения равен $\sqrt{2} = 1,41$. Действительно,

$$K_a = \frac{U_m}{U} = \frac{\sqrt{2}U}{U} = \sqrt{2}.$$

Вопрос № 5. Чем острее кривая, тем больше коэффициент амплитуды. Наоборот, чем ближе форма кривой к прямоугольному импульсу, тем меньше коэффициент амплитуды. На этом основании заключаем, что больший коэффициент амплитуды имеет кривая 1, меньший — кривая 2. Минимальное значение коэффициента амплитуды равно единице.

Карточка № 3.13

Активное сопротивление, индуктивность и емкость — параметры электрических цепей переменного тока

Вопрос № 1. Пластины конденсатора разделены диэлектриком, поэтому включение конденсатора в цепь постоянного тока эквивалентно обрыву цепи, а сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико.

Тот же вывод получается и формальным путем: полагая в формуле

$$x_C = \frac{1}{\omega C},$$

угловую частоту тока равной нулю (постоянный ток), получаем $x_C = \infty$.

Вопрос № 2. Падение напряжения на индуктивности пропорционально скорости изменения тока:

$$u_L = L \frac{di}{dt}.$$

Постоянный ток не создает падения напряжения на индуктивности, сопротивление индуктивности постоянному току равно нулю. Следовательно, в цепи постоянного тока катушка индуктивности обладает только активными сопротивлением R .

Тот же вывод получается и из формулы $x_L = \omega L$.

При равной нулю угловой частоте (постоянный ток) $x_L = 0$.

Вопрос № 3. В общем случае цепь переменного тока характеризуется тремя параметрами: активным сопротивлением r , индуктивностью L и емкостью C .

Вопрос № 4. Катушка индуктивности обычно характеризуется двумя параметрами: активным сопротивлением r и индуктивностью L . Межвитковой емкостью катушки в большинстве случаев можно пренебречь. В определенных условиях можно пренебречь и активным сопротивлением катушки R , если оно мало по сравнению с ее индуктивным сопротивлением.

Вопрос № 5. Конденсатор обычно характеризуется его емкостью. Индуктивностью и активным сопротивлением конденсатора в большинстве случаев можно пренебречь.

Карточка № 3.14

Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Вопрос № 1. В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе, т.е. одновременно достигают соответствующих, например, нулевых, максимальных и т.д. значений.

Этим условиям удовлетворяет график, приведенный в верхней строке.

Вопрос № 2. Вначале находим действующее значение напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{141}{\sqrt{2}} = 100 \text{ В},$$

а затем применяем закон Ома

$$I = \frac{U}{r} = \frac{100}{10} = 10 \text{ В}.$$

Можно вначале применить закон Ома и найти максимальное значение тока, а затем перейти к действующему значению тока:

$$I_m = \frac{U_m}{r} = \frac{141}{10} = 14,1 \text{ А}; I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{14,1}{\sqrt{2}} = 10 \text{ А}.$$

Вопрос № 3. Применив закон Ома, найдем действующее значение приложенного напряжения:

$$U = Ir = 7,07 \cdot 10 = 70,7 \text{ В}.$$

Затем находим амплитуду напряжения:

$$U_m = \sqrt{2}U = 70,7 \cdot \sqrt{2} = 100 \text{ В.}$$

Вопрос № 4. В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе, поэтому векторы, изображающие эти величины, параллельны или совмещены на одной оси и направлены в одну сторону.

Вопрос № 5. Для определения активного сопротивления используем формулу

$$P = UI = IrI = I^2 r.$$

Откуда находим

$$r = \frac{P}{I^2} = \frac{100}{4} = 25 \text{ Ом.}$$

Карточка № 3.15

Цепь переменного тока с индуктивностью

Вопрос № 1. Ток и напряжение на индуктивности связаны соотношением

$$u_L = L \frac{di}{dt}.$$

Таким образом, напряжение пропорционально скорости изменения тока. Скорость изменения синусоидального тока максимальна при переходе тока через нуль. Эти точки помечены на нижнем графике.

Вопрос № 2. В цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения по фазе на 90° , т.е. достигает нулевых, максимальных (и других соответствующих) значений с запозданием по отношению к напряжению. Этим условиям удовлетворяет нижний график.

Вопрос № 3. В цепи с индуктивностью ток отстает по фазе от напряжения на 90° , поэтому вектор тока повернут относительно вектора напряжения на угол 90° по часовой стрелке.

Вопрос № 4. Индуктивное сопротивление определяем по формуле

$$x_L = \omega L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,01 = 3,14 \text{ Ом.}$$

Вопрос № 5. Амплитуду тока находим по закону Ома

$$I_m = \frac{U_m}{x_L} = \frac{100}{10} = 10 \text{ А.}$$

Ток отстает от напряжения по фазе на угол 90° , следовательно:

$$i = 10 \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Карточка № 3.16 Цепь переменного тока с емкостью

Вопрос № 1. Напряжение на конденсаторе и ток в цепи связаны соотношением

$$i = C \frac{du}{dt}.$$

Таким образом, ток пропорционален скорости изменения напряжения. Скорость изменения синусоидального напряжения максимальна при переходе напряжения через нуль. Эти точки помечены на нижнем графике.

Вопрос № 2. В цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на 90° , т.е. достигает нулевых, максимальных (и других соответствующих) значений с опережением по отношению к напряжению. Этим условиям удовлетворяет график, изображенный в средней строке.

Вопрос № 3. В цепи с емкостью ток опережает напряжение по фазе на 90° , поэтому вектор тока повернут относительно вектора напряжения на угол 90° против часовой стрелки.

Вопрос № 4. Емкостное сопротивление конденсатора определяем по формуле

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{31400 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{0,314} \text{ Ом.}$$

Вопрос № 5. Амплитуду тока находим по закону Ома

$$I_m = \frac{U_m}{x_C} = \frac{100}{10} = 10 \text{ А.}$$

Ток опережает напряжение по фазе на 90° , следовательно,

$$i = 10 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Карточка № 3.17

Цепь переменного тока с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости. Треугольник сопротивлений.

Вопрос № 1. На основании закона Ома можно написать

$$U_L = Ix_L; U_C = Ix_C.$$

Из заданной векторной диаграммы очевидно, что

$$U_L > U_C; Ix_L > Ix_C.$$

Таким образом, диаграмма соответствует случаю, когда $x_L > x_C$.

Вопрос № 2. По определению реактивное сопротивление равно разности индуктивного и емкостного сопротивлений:

$$x = x_L - x_C = 5 - 10 = -5 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 3. Для определения полного сопротивления цепи используем формулу

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{3^2 + (-4)^2} = 5 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 4. Угол сдвига по фазе между напряжением и током в ветви определяется соотношением активного и реактивного сопротивлений:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{R} = \frac{-4}{4} = -1; \varphi = -45^\circ.$$

Вопрос № 5. При решении предыдущей задачи мы получили, что $\varphi = -45^\circ$. Знак минус указывает на то, что напряжение отстает от тока по фазе. Этому условию удовлетворяет векторная диаграмма, приведенная в верхней строке.

Знак минус угла φ появляется в том случае, когда $x_C > x_L$. Преобладание емкостного сопротивления приводит к тому, что ток в ветви опережает по фазе приложенное напряжение. В этом случае говорят, что ветвь (или цепь в целом) имеет емкостной характер.

Карточка № 3.18**Закон Ома для цепи переменного тока. Зависимость фазы тока от параметров цепи**

Вопрос № 1. Применяем закон Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{100}{20} = 5 \text{ А.}$$

Вопрос № 2. Вначале определяем ток в цепи

$$i = \frac{u}{z} = \frac{u}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{100}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = 20 \text{ А.}$$

Затем находим падение напряжения на активном сопротивлении:

$$u_R = ir = 20 \cdot 3 = 60 \text{ В.}$$

Вопрос № 3. В рассматриваемой цепи преобладает индуктивное сопротивление, поэтому реактивное сопротивление цепи положительно:

$$x = x_L - x_C = 5 - 2 > 0.$$

Соответственно положительны $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}$ и угол φ сдвига по фазе между током в цепи i и приложенным напряжением u . Это означает, что напряжение опережает по фазе ток, а ток отстает от напряжения по фазе. Цепь имеет индуктивный характер.

Вопрос № 4. В рассматриваемой цепи преобладает емкостное сопротивление, поэтому реактивное сопротивление цепи отрицательно:

$$x = x_L - x_C = 2 - 5 < 0.$$

Соответственно отрицательны $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}$ и угол φ сдвига по фазе между током в цепи i и приложенным напряжением u . Это означает, что напряжение отстает по фазе от тока, а ток опережает напряжение по фазе. Цепь имеет емкостной характер.

Вопрос № 5. В рассматриваемой цепи реактивное сопротивление отрицательно. Это означает, что цепь имеет емкостной характер. В такой цепи ток опережает напряжение по фазе.

Карточка № 3.19 Мощность в цепи переменного тока

Вопрос № 1. Цепь содержит только активное сопротивление. В такой цепи сдвиг по фазе между током и напряжением равен нулю, а $\cos \varphi = 1$.

$$P = UI \cos \varphi = UI = U \frac{U}{r} = \frac{U^2}{r} = \frac{100^2}{10} = 1000 \text{ Вт.}$$

Вопрос № 2. Активную мощность определяем по формуле

$$P = UI \cos \varphi = 100 \cdot 10 \cdot 0,5 = 500 \text{ Вт.}$$

Вопрос № 3. Полную мощность определяем по формуле

$$S = UI = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ В·А.}$$

Вопрос № 4. Реактивную мощность определяем из треугольника мощностей по теореме Пифагора:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{1000^2 - 500^2} = 100\sqrt{75} \text{ ВАр.}$$

Вопрос № 5. Для определения $\cos \varphi$ можно использовать формулу, найденную из треугольника мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{50}{100 \cdot 1} = 0,5.$$

Карточка № 3.20 Коэффициент мощности

Вопрос № 1. Чтобы получить заданную активную мощность при вдвое уменьшенном коэффициенте мощности,

придется вдвое увеличить полную мощность источника. Если напряжение источника постоянно, то удвоение полной мощности происходит за счет соответствующего увеличения тока в 2 раза.

Ответ на поставленный вопрос можно получить и формальным путем, воспользовавшись соотношением

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Вопрос № 2. Для ответа на вопрос следует воспользоваться формулой

$$\Delta P = \frac{P^2 r_{\text{пр}}}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{K}{\cos^2 \varphi}.$$

Отсюда очевидно, что при постоянном K увеличение $\cos \varphi$ в 2 раза приводит к снижению тепловых потерь ΔP в 4 раза.

Вопрос № 3. Генератор рассчитывается на полную мощность сети:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{100}{0,5} = 200 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Вопрос № 4. Если генератор нагружен полной расчетной мощностью 300 000 кВ·А, то при коэффициенте мощности, равном 0,5, только половина полной мощности генератора отдается потребителю и преобразуется в другие виды энергии:

$$P = S \cos \varphi = 300\,000 \cdot 0,5 = 150\,000 \text{ кВт}.$$

Вопрос № 5. При увеличении коэффициента мощности до 0,8 генератор, рассмотренный в предыдущем вопросе, будет отдавать потребителю активную мощность.

$$P = S \cos \varphi = 300\,000 \cdot 0,8 = 240\,000 \text{ кВт}.$$

Таким образом, повышение коэффициента мощности приводит к значительно лучшему использованию генератора.

Карточка № 3.21

Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности

Вопрос № 1. Рассматриваемая цепь имеет индуктивный характер, поэтому ток в цепи отстает от приложенного напряжения по фазе. В цепи с чисто индуктивным сопротивлением угол сдвига по фазе между током и напряжением равен 90° , в цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность, угол всегда меньше 90° . Этим условиям удовлетворяет векторная диаграмма, изображенная в верхней строке.

Вопрос № 2. Для решения задачи следует воспользоваться законом Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}}.$$

По условию задачи $x_C = 0$, $x = x_L$. Таким образом,

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{100}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = 10 \text{ А.}$$

Вопрос № 3. Определяем амплитуду тока и сдвиг по фазе между током и напряжением:

$$I_m = \frac{U_m}{z} = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+1}} = 1 \text{ А;}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L}{r} = 1; \varphi = 45^\circ.$$

Таким образом, ток отстает от напряжения по фазе на 45° :

$$i = \sin(\omega t - 45^\circ).$$

Вопрос № 4. Определяем амплитуду напряжения и сдвиг по фазе между током и напряжением:

$$U_m = I_m z = I_m \sqrt{r^2 + x_L^2} = 1 \cdot \sqrt{1+1} = \sqrt{2} \text{ В;}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L}{r} = 1; \varphi = 45^\circ.$$

Таким образом, ток отстает от напряжения по фазе на 45° :

$$u = \sqrt{2} \sin (\omega t + 45^\circ).$$

Вопрос № 5. Из треугольника мощностей

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{300^2 + 400^2} = 500 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Карточка № 3.22

Последовательное соединение активного сопротивления и емкости

Вопрос № 1. Из векторной диаграммы очевидно, что ток в цепи опережает по фазе приложенное напряжение на угол, меньший 90° . Этим условиям удовлетворяет цепь, содержащая r и C .

Вопрос № 2. Полное сопротивление находим по формуле

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

положив в ней $x_L = 0$:

$$z = \sqrt{r^2 + (-x_C)^2} = \sqrt{10^2 + (-10)^2} = 10\sqrt{2} \text{ Ом}.$$

Угол сдвига по фазе между током и напряжением определяем по его тангенсу:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{-10}{10} = -1; \varphi = -45^\circ.$$

Вопрос № 3. Вначале определяем амплитуду тока:

$$I_m = \frac{U_m}{z} = \frac{141}{\sqrt{2} \cdot 10} = 10 \text{ А}.$$

Затем записываем выражение тока, учитывая, что в рассматриваемой цепи напряжение отстает по фазе от тока на угол 45° :

$$i = 10 \sin (\omega t + 45^\circ).$$

Можно рассуждать и следующим образом:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

В нашем случае начальная фаза напряжения $\psi_u = 0$, сдвиг по фазе $\varphi = -45^\circ$. Тогда начальная фаза тока

$$\psi_i = \psi_u - \varphi = 0 - (-45^\circ) = 45^\circ.$$

Вопрос № 4. Вначале определяем амплитуду напряжения

$$U_m = I_m Z = 10 \cdot 10\sqrt{2} = 141 \text{ В}.$$

Затем записываем выражение для напряжения, учитывая, что в рассматриваемой цепи напряжение отстает по фазе от тока на угол 45° :

$$u = 141 \sin(\omega t - 45^\circ).$$

Вопрос № 5. Воспользуемся известными формулами:

$$P = UI \cos \varphi = 100 \cdot \frac{10}{\sqrt{2}} \cos(-45^\circ) = 500 \text{ Вт};$$

$$Q = UI \sin \varphi = 100 \cdot \frac{10}{\sqrt{2}} \sin(-45^\circ) = -500 \text{ ВАр}.$$

Карточка № 3.23

Цепь переменного тока с параллельным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости

Вопрос № 1. Последовательно находим:

$$g = \frac{1}{r} = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b_L = \frac{1}{x_L} = 0,1 \text{ Ом}^{-1}; \quad b_C = \frac{1}{x_C} = 0,1 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b = b_L - b_C = 0.$$

Вопрос № 2. Величины токов определяем из соотношений:

$$I_R = Ug = 100 \cdot 0,1 = 10 \text{ A};$$

$$I_L = Ub_L = 100 \cdot 0,1 = 10 \text{ A};$$

$$I_C = Ub_C = 100 \cdot 0,1 = 10 \text{ A}.$$

Вопрос № 3. Последовательно находим

$$b = b_L - b_C = 0,2 - 0,6 = -0,4 \text{ Ом}^{-1};$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(0,3)^2 + (-0,4)^2} = 0,5 \text{ Ом}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Из треугольника проводимостей получаем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g} = \frac{0,5}{0,5} = 1; \varphi = 45^\circ.$$

Вопрос № 5. Из треугольника проводимостей получаем

$$y = \frac{b}{\sin \varphi} = \frac{0,5}{\sin 30^\circ} = 1 \text{ Ом}^{-1}.$$

Карточка № 3.24

Схемы замещения электрической ветви переменного тока

Вопрос № 1. Для определения индуктивного и емкостного сопротивлений используем известные формулы

$$x_L = \omega L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot \frac{6}{314} = 6 \text{ Ом};$$

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1 \cdot 314}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,5} = 2 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 2. Величина r задана: $r = 3 \text{ Ом}$; реактивное сопротивление определяем по формуле

$$x = x_L - x_C = 6 - 2 = 4 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 3. Вначале определяем

$$z^2 = r^2 + x^2 = 3^2 + 4^2 = 25 \text{ Ом.}$$

Затем находим активную и реактивную проводимости на схеме замещения

$$g = \frac{r}{z^2} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b = \frac{x}{z^2} = \frac{4}{25} = 0,16 \text{ Ом}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Произведя необходимые подстановки, получим

$$I_1 = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{100}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = 20 \text{ А.}$$

Вопрос № 5. Произведя необходимые подстановки, получим

$$I_2 = Uy = U\sqrt{g^2 + b^2} = 100\sqrt{(0,12)^2 + (0,16)^2} = 20 \text{ А.}$$

Поскольку схемы замещения представляют одну и ту же реальную ветвь электрической цепи, то естественно, что ток I_2 и ток I_1 , найденный в ответе на предыдущий вопрос, оказались одинаковыми.

Карточка № 3.25

Последовательное и параллельное соединения потребителей в цепи переменного тока

Вопрос № 1. Вначале определяем активную и реактивную составляющие z :

$$r = r_1 + r_2 = 5 + 1 = 6 \text{ Ом};$$

$$x = x_1 + x_2 = 3 - 11 = -8 \text{ Ом.}$$

Затем определяем полное сопротивление эквивалентной ветви

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{6^2 + (-8)^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Вопрос № 2. Вначале определяем активную и реактивную составляющие y :

$$g = g_1 + g_2 = 0,1 + 0,2 = 0,3 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b = b_1 + b_2 = 0,5 - 0,1 = 0,4 \text{ Ом}^{-1}.$$

Затем определяем полную проводимость эквивалентной ветви:

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(0,3)^2 + (0,4)^2} = 0,5 \text{ Ом}^{-1}.$$

Вопрос № 3. Последовательно находим:

$$g_1 = \frac{r_1}{z_1^2} = \frac{r_1}{r_1^2 + x_1^2} = \frac{4}{4^2 + 3^2} = 0,16 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{8}{4^2 + 3^2} = 0,12 \text{ Ом}^{-1};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{r_2}{r_2^2 + x_2^2} = \frac{8}{8^2 + 6^2} = 0,08 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{6}{8^2 + 6^2} = 0,06 \text{ Ом}^{-1};$$

$$g = g_1 + g_2 = 0,16 + 0,08 = 0,24 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b = b_1 + b_2 = 0,12 + 0,06 = 0,18 \text{ Ом}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Вначале определяем y :

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(0,24)^2 + (0,18)^2} = 0,3 \text{ Ом}^{-1}.$$

Затем определяем полное сопротивление эквивалентной ветви:

$$z = \frac{1}{y} = \frac{1}{0,3} = \frac{10}{3} \text{ Ом}.$$

Вопрос № 5. Воспользуемся общей формулой

$$\begin{aligned} y &= \sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (b_1 + b_2 + b_3)^2} = \\ &= \sqrt{(0,1 + 0,1 + 0,1)^2 + (0,3 + 0,3 - 0,2)^2} = 0,5 \text{ Ом}^{-1}. \end{aligned}$$

Карточка № 3.26

Расчет цепи переменного тока методом сопротивлений и проводимостей

Вопрос № 1. Соответствующие вычисления произведены при ответе на вопрос № 3 предыдущей карточки.

Вопрос № 2. Последовательно находим:

$$g_{12} = g_1 + g_2 = 0,16 + 0,08 = 0,24 \text{ Ом}^{-1};$$

$$b_{12} = b_1 + b_2 = 0,12 + 0,06 = 0,18 \text{ Ом}^{-1};$$

$$y_{12} = \sqrt{y_{12}^2 + b_{12}^2} = \sqrt{(0,24)^2 + (0,18)^2} = 0,3 \text{ Ом}^{-1}.$$

Вопрос № 3. Применяем формулы, выведенные при рассмотрении схем замещения электрической ветви

$$r_{12} = \frac{g_{12}}{y_{12}^2} = \frac{0,24}{0,09} = \frac{8}{3} \text{ Ом}; \quad x_{12} = \frac{b_{12}}{y_{12}^2} = \frac{0,18}{0,09} = 2 \text{ Ом}$$

Вопрос № 4. Последовательно находим

$$r = r_3 + r_{12} = \frac{1}{3} + \frac{8}{3} = 3 \text{ Ом};$$

$$x = x_3 + x_{12} = 2 + 2 = 4 \text{ Ом};$$

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 5. Для определения величины тока воспользуемся формулой закона Ома:

$$I = \frac{U}{z} = \frac{100}{5} = 20 \text{ А}.$$

Коэффициент мощности цепи находим из треугольника сопротивлений:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = 0,6.$$

К главе 4

Карточка № 4.1

Резонанс напряжений. Физическая сущность явления

Вопрос № 1. Если на упругую механическую систему, имеющую частоту собственных колебаний ω_0 , действует периодическая сила

$$F = F_m \sin \omega t,$$

то можно показать, что максимальное отклонение α выражается следующей формулой:

$$\alpha = \frac{F_m}{\sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2}}.$$

Из этой формулы очевидно, что максимальное отклонение пропорционально амплитуде приложенной силы и сложным образом зависит от частоты ω приложенной силы. При $\omega = \omega_0$ максимальное отклонение достигает наибольшего значения.

Таким образом, максимальный угол отклонения пластины определяется амплитудой силы F и частотой ее приложения.

Вопрос № 2. В рассматриваемой цепи при действии $e = E_m \sin \omega t$ амплитуда тока определяется выражением

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

откуда очевидно, что амплитуда тока в цепи прямо пропорциональна амплитуде ЭДС и сложным образом зависит от частоты ЭДС.

При $\omega = \frac{1}{LC}$ выражение $\omega L - \frac{1}{\omega C}$ обращается в нуль, а амплитуда тока становится наибольшей.

Таким образом, амплитуда тока в цепи зависит от амплитуды ЭДС и ее частоты.

Для понимания физической сущности резонанса особенно важно отметить зависимость амплитуды тока от частоты ЭДС.

Вопрос № 3. Угловая частота собственных незатухающих колебаний электрического контура определяется выражением

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Подставляя сюда значения

$$L = 1 \text{ Гн и } C = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

находим

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} = \sqrt{10^6} = 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Условие резонанса напряжений можно представить в следующем виде:

$$\omega = \omega_0,$$

где ω — частота ЭДС, действующей в цепи; ω_0 — частота собственных незатухающих колебаний контура.

Находим ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} = 1000 \text{ с}^{-1}.$$

Сравнивая заданные выражения ЭДС с формулой

$$e = E_m \sin \omega t,$$

находим, что и в случае *a*, и в случае *б* частота действующей в контуре ЭДС $\omega = 1000 \text{ с}^{-1}$.

Следовательно, условие резонанса напряжений выполняется в обоих случаях.

Вопрос № 5. При резонансе конденсатор и катушка индуктивности обмениваются энергией, при этом электри-

ческая энергия конденсатора преобразуется в магнитную энергию катушки и наоборот.

В цепи, где имеются только катушки или только конденсаторы, процесс колебаний энергии невозможен, а следовательно, невозможен и режим резонанса.

Карточка № 4.2

Резонанс напряжений. Основные определения.

Вопрос № 1. Резонанс в рассматриваемой цепи возникает, когда частота приложенного напряжения равна частоте собственных незатухающих колебаний в контуре.

Находим

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{10 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = 1000 \text{ с}^{-1}.$$

Следовательно, условие резонанса выполняется.

Вопрос № 2. Резонанс напряжений возникает, когда частота приложенного напряжения равна частоте собственных незатухающих колебаний в контуре.

Находим

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} = 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Следовательно, угловая частота приложенного напряжения должна равняться $10\,000 \text{ с}^{-1}$. Из приведенных в ответах напряжений этому условию удовлетворяет только напряжение

$$u = 10 \sin (100\,00 t + 90^\circ).$$

Вопрос № 3. При резонансе напряжений

$$x_L = x_C = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{10^{-2}}{10^{-6}}} = 100 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 4. При резонансе напряжений падение напряжения на емкости равно падению напряжения на индуктивности, следовательно,

$$U_{cd} = U_{ab} = 100 \text{ В}.$$

Вопрос № 5. При резонансе напряжений ток в цепи и напряжение на ее зажимах совпадают по фазе, $\varphi = 0$.

Карточка № 4.3

Волновое сопротивление и добротность контура

Вопрос № 1. При резонансе напряжений сопротивление конденсатора и сопротивление катушки равны между собой и равны волновому сопротивлению контура.

Исходя из этого устанавливаем, что сопротивление катушки $\omega_0 L = 20$ Ом и волновое сопротивление $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = 20$ Ом.

Вопрос № 2. Волновое сопротивление цепи равно индуктивному и емкостному сопротивлению цепи при резонансе

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Вопрос № 3. Волновое сопротивление цепи определяется по формуле

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,1}{10 \cdot 10^{-6}}} = \sqrt{10^4} = 100 \text{ Ом}.$$

Вопрос № 4. При резонансе напряжений сопротивление конденсатора равно волновому сопротивлению цепи. Следовательно, по условию задачи оно равно 20 Ом.

Напряжение на конденсаторе определяем по закону Ома:

$$U_C = I x_C = 10 \cdot 20 = 200 \text{ В}.$$

Вопрос № 5. Добротность контура может быть выражена через отношение напряжений

$$Q = \frac{U_C}{U},$$

где U_C — напряжение на конденсаторе; U — напряжение, приложенное к цепи.

Отсюда находим

$$U = \frac{U_C}{Q} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ В.}$$

Карточка № 4.4

Частотные характеристики контура

Вопрос № 1. Условие резонанса напряжений можно записать в виде

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Отсюда очевидно, что резонанс может быть получен изменением любой из трех величин, входящих в уравнение: ω , L , C .

Изменяя активное сопротивление цепи R , нельзя получить резонанс напряжений.

Вопрос № 2. Для ответа на вопрос следует использовать формулы, показывающие зависимость емкостного и индуктивного сопротивлений от частоты:

$$x_C = \frac{1}{\omega C}; \quad x_L = \omega L.$$

Отсюда очевидно, что при увеличении частоты емкостное сопротивление уменьшается, индуктивное — увеличивается.

Вопрос № 3. Используем формулу полного сопротивления рассматриваемой цепи:

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

При частоте, равной нулю, емкостное сопротивление цепи $x_C = \frac{1}{\omega C}$ бесконечно велико, следовательно, бесконечно велико и полное сопротивление цепи z .

При $\omega = \infty$ индуктивное сопротивление цепи $x_L = \omega L$ и полное сопротивление z также бесконечно велики.

При $x_L = x_C$ полное сопротивление достигает минимума: $z = r$.

Следовательно, полное сопротивление цепи сначала уменьшается, потом увеличивается.

Вопрос № 4. При $x_L > x_C$ цепь имеет индуктивный характер (преобладает индуктивное сопротивление). В такой цепи ток отстает по фазе от приложенного напряжения.

Вопрос № 5. О добротности контура можно судить по его полосе пропускания. Чем уже полоса пропускания контура, тем выше его добротность.

Под полосой пропускания понимают полосу частот, в пределах которой ток в контуре имеет значения, не меньше чем $0,7 I_m$, где I_m — максимальный ток в контуре, соответствующий резонансной частоте.

Из приведенного в задании рисунка нетрудно установить, что у второго контура полоса частот меньше, а следовательно, добротность выше, чем у первого.

Карточка № 4.5

Резонанс токов. Резонансная частота

Вопрос № 1. В том случае, когда источник переменного напряжения подключен параллельно ветвям колебательного контура, возможно возникновение резонанса токов.

Вопрос № 2. По определению резонанс токов — это такой режим работы электрической цепи, при котором ток на входе цепи и напряжение на ее зажимах совпадают по фазе.

Это условие выполняется, когда полная проводимость цепи $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ является активной и соответственно реактивная проводимость равна нулю:

$$b = b_L - b_C = 0; \quad b_L = b_C.$$

Поскольку

$$b_L = \frac{x_L}{z_1^2}, \quad b_C = \frac{x_C}{z_2^2},$$

то условие резонанса токов в рассматриваемой цепи может быть представлено в виде

$$\frac{x_L}{z_1^2} = \frac{x_C}{z_2^2}.$$

Вопрос № 3. Для определения резонансной частоты воспользуемся формулой

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \rho^2}{r_2^2 - \rho^2}},$$

которая при равенстве активных сопротивлений параллельных ветвей принимает более простой вид:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{10^{-2} \cdot 10^{-6}}} = 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Вопрос № 4. Вначале определяем волновое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6}}} = 10 \text{ Ом}.$$

Резонансную частоту определяем по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \rho^2}{r_2^2 - \rho^2}} = \sqrt{\frac{500 - 100}{200 - 100}} \cdot \frac{1}{\sqrt{10^{-2} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

Вопрос № 5. Вначале определяем волновое сопротивление

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{10^{-2}}{10^{-6}}} = 100 \text{ Ом}.$$

Затем убеждаемся, что

$$R_1^2 \ll \rho^2 \text{ и } R_2^2 \ll \rho^2.$$

Следовательно, можно пользоваться приближенной формулой

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{10^{-2} \cdot 10^{-6}}} = 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Карточка № 4.6

Резонанс токов в идеальном контуре

Вопрос № 1. Приближенная формула $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$ справедлива при условии, что активные сопротивления ветвей контура малы по сравнению с реактивными сопротивлениями ветвей.

Вопрос № 2. Условием резонанса токов является равенство реактивных проводимостей ветвей, образующих контур. В рассматриваемом случае

$$b_L = \frac{1}{x_L} = \frac{1}{\omega L}; \quad b_C = \frac{1}{x_C} = \omega C.$$

Следовательно, условие резонанса токов приобретает вид:

$$\frac{1}{\omega L} = \omega C.$$

Вопрос № 3. Волновое сопротивление равно индуктивному или емкостному сопротивлению контура при резонансной частоте. В данном случае

$$x_L = x_C = \frac{1}{b_1} = \frac{1}{b_2} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ Ом}.$$

Следовательно, волновое сопротивление равно 100 Ом.

Вопрос № 4. В контуре, у которого активные сопротивления ветвей малы по сравнению с реактивными сопротивлениями, токи в ветвях приблизительно во столько раз превосходят ток в неразветвленной части цепи, во сколько раз волновое сопротивление больше суммы активных сопротивлений ветвей:

$$\frac{I_1}{I} \approx \frac{\rho}{r_1 + r_2}; \quad I_1 \approx I \frac{\rho}{r_1 + r_2} = 1 \cdot \frac{100}{1+1} = 50 \text{ А}.$$

Вопрос № 5. При изменении частоты приложенного напряжения от 0 до ∞ полное сопротивление цепи плавно увеличивается до максимального значения, а затем уменьшается.

Карточка № 4.7**Использование электрического резонанса в технических устройствах**

Вопрос № 1. Добротность определяется как отношение напряжения на конденсаторе к напряжению, приложенному к цепи:

$$Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U}.$$

Отсюда находим напряжение на конденсаторе при резонансе:

$$U_C = QU = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ В}.$$

Вопрос № 2. Затухание можно определить как отношение приложенного к контуру напряжения к напряжению на индуктивности при резонансе:

$$d = \frac{U}{U_L} = \frac{U}{U_C}.$$

Отсюда находим напряжение на индуктивности:

$$U_L = \frac{U}{d} = \frac{10}{0,01} = 1000 \text{ В}.$$

Вопрос № 3. Настроить входной контур приемника на частоту принимаемой радиостанции — это значит так изменить параметры контура, чтобы его резонансная частота равнялась частоте радиостанции.

Поэтому поставленная задача сводится к определению резонансной частоты контура по известной формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3}}} = 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

Именно такую угловую частоту имеют колебания принимаемой радиостанции.

Вопрос № 4. Пятая гармоника имеет частоту

$$f = 500 \cdot 5 = 2500 \text{ Гц.}$$

Настроенный на эту частоту контур будет выделять колебания с частотой 2500 Гц.

Вопрос № 5. Явление электрического резонанса используется во всех перечисленных в ответах устройствах.

Карточка № 4.8

Способы улучшения коэффициента мощности

Вопрос № 1. Ток конденсатора должен скомпенсировать реактивную составляющую тока потребителя, следовательно,

$$I_C = I \sin \varphi.$$

Вопрос № 2. Нам неизвестна величина тока потребителя, соответствующая углу φ' . Поэтому ток конденсатора выражаем через активную составляющую тока I , которая равна $I \cos \varphi$.

Таким образом,

$$I_C = I \cos \varphi (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi').$$

Вопрос № 3. Составляем равенство

$$U \omega C = I \cos \varphi (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi'),$$

откуда находим

$$C = \frac{I \cos \varphi}{U \omega} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi').$$

Вопрос № 4. Умножаем числитель и знаменатель найденного выше выражения на U и замечаем, что

$$UI \cos \varphi = P.$$

Вопрос № 5. Чтобы разгрузить линию от реактивной нагрузки, можно:

– подсоединить параллельно нагрузке специально подобранный конденсатор;

- подсоединить параллельно нагрузке синхронный компенсатор;
- обеспечить работу потребителей при номинальных режимах.

Для указанной цели нельзя использовать резонанс напряжений, так как при постоянстве напряжения источника питания компенсация индуктивного сопротивления приведет к увеличению тока в цепи; кроме того, напряжение на потребителе (и конденсаторе) будет значительно превышать номинальное напряжение.

К главе 5

Карточка № 5.1 Основные понятия

Вопрос № 1. Падение напряжения на индуктивном сопротивлении и ток, протекающий через катушку, связаны соотношением

$$u_L = L \frac{di}{dt}.$$

Подставив сюда заданный ток, найдем

$$u_L = L \frac{di}{dt} (I_m \sin \omega t) = L \omega I_m \cos \omega t = x_L I_m \cos \omega t,$$

где $\omega L = x_L$ — индуктивное сопротивление катушки.

Вопрос № 2. Напряжение на конденсаторе и ток, протекающий через конденсатор, связаны соотношением

$$i = C \frac{du}{dt}.$$

Подставив сюда заданное напряжение, найдем

$$i = C \frac{d}{dt} (U_m \sin \omega t) = C \omega U_m \cos \omega t = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \cos \omega t = \frac{U_m}{x_C} \cos \omega t,$$

где $\frac{1}{\omega C} = x_C$ — емкостное сопротивление конденсатора.

Вопрос № 3. Синусоидальную функцию времени можно отобразить вектором, а вектор изобразить комплексным числом. Таким образом, между синусоидальной функцией времени и комплексным числом можно установить однозначное соответствие.

Вопрос № 4. Действующее значение синусоидальной величины обозначается большой буквой без индекса (например, U, I, E); комплексное число, изображающее синусоидальную функцию времени, обозначается соответствующей буквой с точкой наверху: $\dot{U}, \dot{I}, \dot{E}$.

Вопрос № 5. Все методы расчета цепей постоянного тока можно использовать для расчета цепей переменного тока, если расчеты производить символическим методом.

Карточка № 5.2

Изображение синусоидального тока (напряжения) вектором

Вопрос № 1. Из графика очевидно, что при $i = 0$ ток имеет максимальное значение. Такой синусоиде должен соответствовать вектор, который в исходном положении дает максимальную проекцию на вертикальную ось. Соответствующий синусоиде вектор изображен внизу.

Вопрос № 2. Из графика очевидно, что начальная фаза напряжения $\psi_u = -30^\circ$. Этому напряжению соответствует вектор, повернутый на 30° относительно горизонтальной оси по часовой стрелке.

Вопрос № 3. Полному циклу изменений тока (периоду тока) соответствует полный оборот вектора.

При частоте 50 Гц в одной секунде укладывается 50 периодов тока, следовательно, вектор, изображающий этот ток, вращается со скоростью 50 об/с.

Вопрос № 4. По определению вектор, изображающий синусоидальный ток, повернут относительно горизонтальной оси на угол, равный начальной фазе тока.

Из заданного выражения тока устанавливаем, что начальная фаза тока $\psi_i = \frac{\pi}{2}$. Следовательно, изображающий вектор повернут относительно горизонтальной оси на 90° против часовой стрелки, как это показано на нижней диаграмме.

Вопрос № 5. Вектор повернут относительно горизонтальной оси на 150° против часовой стрелки. Следовательно, начальная фаза синусоидального напряжения, изображаемого этим вектором, $\psi_u = 150^\circ$. Амплитуда напряжения равна модулю вектора U_m . Этим условиям удовлетворяет выражение

$$u = U_m \sin(\omega t + 150^\circ).$$

Равенства

$$u = U_m \sin 150^\circ \text{ и } u = U_m \sin 30^\circ$$

представляют собой не формулы синусоидального напряжения, а два мгновенных значения напряжения (два числа).

Карточка № 5.3

Изображение вектора комплексным числом

Вопрос № 1. Вектору соответствует комплексное число, определяющее положение на комплексной плоскости точки, совпадающей с концом вектора.

Вопрос № 2. Вектор \dot{A} определяется комплексным числом $2 - j2$, определяющим положение конца вектора на комплексной плоскости.

Вопрос № 3. Модуль вектора определяем по теореме Пифагора

$$A = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2\sqrt{2}.$$

Угол наклона вектора к горизонтальной оси находим по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{+2}{2} = +1; \quad \alpha = +45^\circ.$$

Вопрос № 4. Зная модуль комплексного числа $A = 2\sqrt{2}$ и аргумент $\alpha = -45^\circ$, выражаем через тригонометрические функции действительную и мнимую часть комплексного числа:

$$\dot{A} = 2\sqrt{2} \cos(-45^\circ) + j2\sqrt{2} \sin(-45^\circ) = 2\sqrt{2} (\cos 45^\circ - j \sin 45^\circ).$$

Вопрос № 5. Применяя формулу Эйлера, находим

$$\cos 45^\circ - j \sin 45^\circ = e^{-j45^\circ}.$$

Следовательно,

$$\dot{A} = 2\sqrt{2} e^{-j45^\circ}.$$

Карточка № 5.4**Запись синусоидальных токов и напряжений в символической форме. Переход от символической записи к синусоидальной функции времени**

Вопрос № 1. Модуль комплексного числа равен амплитуде напряжения, коэффициент при j – начальной фазе, следовательно,

$$\dot{U}_m = 100e^{-j30^\circ}; \dot{U} = \frac{100}{\sqrt{2}}e^{-j30^\circ}.$$

Вопрос № 2. Комплексное число, соответствующее напряжению, записываем в показательной форме (см. ответ на предыдущий вопрос), а затем по формуле Эйлера переходим к алгебраической форме записи:

$$\dot{U} = \frac{100}{\sqrt{2}}e^{-j135^\circ} = \frac{100}{\sqrt{2}}(\cos 135^\circ + j\sin 135^\circ) = -50 + j50.$$

Вопрос № 3. Прежде всего следует записать ток в виде синусоиды

$$i = 10 \cos \omega t = 10 \sin (\omega t + 90^\circ).$$

Далее, действуя, как при ответе на вопрос № 1, находим

$$\dot{i} = \frac{10}{\sqrt{2}}e^{j90^\circ}.$$

Вопрос № 4. Модуль комплексного числа равен действующему значению тока, коэффициент при j – начальной фазе тока ψ_i , следовательно,

$$i = I \cdot \sqrt{2} \sin (\omega t + \psi_i) = 10 \sin (\omega t - 30^\circ).$$

Вопрос № 5. Учитывая, что

$$\dot{U}_m = 100e^{-j180^\circ} = -100e^{j0^\circ} = -100,$$

находим изображаемое напряжение:

$$u = -100\sqrt{2} \sin \omega t.$$

Карточка № 5.5
Выражение сопротивлений и проводимостей
в комплексной форме. Выражение электрической
мощности в комплексной форме

Вопрос № 1. Вначале записываем напряжение и ток в комплексной форме:

$$\dot{U} = \frac{100}{\sqrt{2}} e^{-j30^\circ}; \dot{i} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{-j75^\circ}.$$

Затем находим комплекс полного сопротивления ветви:

$$\dot{z} = \frac{\dot{U}}{\dot{i}} = 10e^{j45^\circ}.$$

Вопрос № 2. Представляем комплекс полного сопротивления в алгебраической форме

$$\dot{z} = r + jx = 10\sqrt{2}e^{-j45^\circ} = 10\sqrt{2}(\cos 45^\circ - j\sin 45^\circ) = 10 - j10.$$

Таким образом, $R = 10 \text{ Ом}$; $x = -10 \text{ Ом}$.

Вопрос № 3. В показательной форме комплекса полного сопротивления коэффициент при j равен углу сдвига по фазе между током и напряжением: $\varphi = 30^\circ$.

Вопрос № 4. По определению

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{100e^{j90^\circ}} = 0,01e^{-j90^\circ}.$$

Вопрос № 5. Выразим мощность в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{U}\dot{I}^* = 100\sqrt{2}e^{j15^\circ} \cdot 10e^{-j60^\circ} = 1000\sqrt{2}e^{-j45^\circ} = \\ &= 1000\sqrt{2}(\cos 45^\circ - j\sin 45^\circ) = 1000 - j1000. \end{aligned}$$

Действительная часть полученного комплексного числа равна активной мощности, коэффициент при j – реактивной мощности, следовательно,

$$P = 1000 \text{ Вт}; Q = -1000 \text{ ВАр}.$$

Знак минус показывает, что цепь имеет емкостной характер.

Карточка № 5.6

Законы Ома и Кирхгофа в символической форме

Вопрос № 1. Запись закона Ома в символической форме имеет вид

$$i = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}.$$

Вопрос № 2. Применяем закон Ома в символической форме:

$$i = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{100e^{j30^\circ}}{10e^{j15^\circ}} = 10e^{j15^\circ}.$$

Вопрос № 3. Применяем закон Ома в символической форме, предварительно записав комплекс полного сопротивления в показательной форме:

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= 10 + j10 = 10\sqrt{2}e^{j45^\circ}; \\ i &= \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{100\sqrt{2}}{10\sqrt{2}e^{j45^\circ}} = 10e^{-j45^\circ}.\end{aligned}$$

Вопрос № 4. Применяем первый закон Кирхгофа в символической форме

$$\begin{aligned}\dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 10e^{j90^\circ} + 10e^{-j90^\circ} = \\ &= 10(\cos 90^\circ + j\sin 90^\circ) + 10(\cos 90^\circ - j\sin 90^\circ) = 0.\end{aligned}$$

Вопрос № 5. ЭДС определяем из уравнения второго закона Кирхгофа, записанного для внешнего контура:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{I}\dot{Z} + \dot{I}_2\dot{Z}_2 = 2\sqrt{2}e^{-j45^\circ} \cdot 10e^{j90^\circ} + \\ &+ \sqrt{2}e^{-j45^\circ} \cdot 5e^{j90^\circ} = 20\sqrt{2}e^{j45^\circ} + 5\sqrt{2}e^{j45^\circ} = \\ &= 20 + j20 + 5 + j5 = 25 + j25.\end{aligned}$$

Карточка № 5.7

Пример расчета неразветвленной электрической цепи

Вопрос № 1. Вначале находим x :

$$x = x_L - x_{C1} - x_{C2} = 3 - 3,5 - 3,5 = -4 \text{ Ом.}$$

Затем записываем комплекс полного сопротивления цепи:

$$\dot{Z} = z + jx = 3 - j4.$$

Вопрос № 2. Применяем закон Ома в символической форме

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{\frac{100}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ}}{3 - j4} = \frac{\frac{100}{\sqrt{2}}}{5e^{-j53^\circ 10'}} = \frac{20}{\sqrt{2}} e^{j53^\circ 10'}.$$

Вопрос № 3. Модуль комплекса \dot{i} равен действующему значению тока, коэффициент при j – начальной фазе, следовательно,

$$i = 20 \sin(\omega t + 53^\circ 10').$$

Вопрос № 4. Применяем закон Ома в символической форме:

$$\dot{U}_{C2} = \dot{i} \cdot (-jx_{C2}) = \frac{20}{\sqrt{2}} e^{j53^\circ 10'} \cdot 3,5 e^{-j90^\circ} = \frac{70}{\sqrt{2}} e^{-j36^\circ 50'}.$$

Вопрос № 5. Модуль комплекса U_{C2} равен действующему значению напряжения на конденсаторе, коэффициент при j – начальной фазе, следовательно,

$$u = 70 \sin(\omega t - 36^\circ 50').$$

Карточка № 5.8

Применение символического метода к расчету разветвленных цепей переменного тока

Вопрос № 1. Вычисления можно произвести в следующем порядке:

$$z_C = -jx_C = -j \frac{10}{3}; y_C = \frac{1}{z_C} = j \frac{3}{10};$$

$$y_r = \frac{1}{r} = \frac{4}{10}.$$

Вопрос № 2. Последовательно находим

$$y_{rC} = y_r + y_C = 0,4 + j0,3 = 0,5e^{j36^\circ 50'};$$

$$z_{rC} = \frac{1}{y_{rC}} = 2e^{-j36^\circ 50'}.$$

Вопрос № 3. Вот правильное решение:

$$z = z_{rC} + jx_L = 2(\cos 36^\circ 50' - j\sin 36^\circ 50') + j2,4 =$$

$$= 1,6 - j1,2 + j2,4 = 1,6 + j1,2.$$

Вопрос № 4. Последовательно находим:

$$z = 1,6 + j1,2 = 2e^{j36^\circ 50'}; \dot{U} = 100e^{j0^\circ};$$

$$i = \frac{\dot{U}}{z} = 50e^{-j36^\circ 50'}.$$

Вопрос № 5. Модуль найденного выше комплекса тока I равен действующему значению тока, коэффициент при j – начальной фазе тока, следовательно,

$$i = 50\sqrt{2} \sin(\omega t - 36^\circ 50').$$

К главе 6

Карточка № 6.1

Переходные процессы в электрических цепях, причины их возникновения. Основные законы коммутации

Вопрос № 1. В цепи, не содержащей реактивных элементов, способных накапливать и отдавать электрическую энергию, не возникает переходных процессов.

Вопрос № 2. В цепи имеется катушка индуктивности, способная накапливать электрическую энергию. В такой цепи возникает переходный процесс как при подключении ее к источнику постоянного напряжения, так и при подключении ее к источнику переменного напряжения (в общем случае).

Вопрос № 3. При изменении параметров цепи, содержащей реактивные элементы, возникает переходный процесс.

Вопрос № 4. В ветви с индуктивностью ток не может измениться скачком, так как для этого требуется источник бесконечно большого напряжения.

Ветвь с емкостью не накладывает ограничений на скорость изменения тока. В идеальном конденсаторе ток может измениться скачком. Реальный конденсатор и соединительные провода обладают индуктивностью, хотя и пренебрежимо малой, поэтому скорость изменения тока в такой ветви ограничена. В задаче имеется в виду идеальный конденсатор.

Вопрос № 5. Напряжение на конденсаторе не может измениться скачком, так как для этого требуется источник бесконечно большого тока.

Ветвь с индуктивностью не накладывает ограничений на скорость изменения напряжения. Напряжение на идеальной катушке может измениться скачком. Реальная катушка индуктивности обладает межвитковой емкостью, хотя и очень малой, поэтому скорость изменения напряжения на катушке ограничена. В задаче имеется в виду идеальная катушка.

Карточка № 6.2

Принужденные и свободные составляющие токов и напряжений

Вопрос № 1. В цепи, не содержащей реактивных элементов, способных накапливать и отдавать электрическую энергию, не возникает переходных процессов.

Вопрос № 2. В установившемся режиме напряжение на конденсаторе будет постоянным, поэтому будет

$$rC \frac{du_C}{dt} = 0.$$

Из уравнения второго закона Кирхгофа следует

$$u_{Cnp} = U.$$

Вопрос № 3. Свободная составляющая напряжения на конденсаторе возникает за счет энергии, запасенной в реактивных элементах цепи. Поэтому уравнение для свободной составляющей получается из исходного уравнения, если положить напряжение источника питания равным нулю.

Вопрос № 4. В установившемся режиме ток в цепи будет постоянным, поэтому будет

$$L \frac{di}{dt} = 0.$$

Из уравнения второго закона Кирхгофа следует

$$U = r i_{np}; i_{np} = \frac{U}{r}.$$

Вопрос № 5. Свободная составляющая тока возникает за счет энергии, запасенной в реактивных элементах цепи. Уравнение для свободной составляющей получается из исходного уравнения, если положить напряжение источника питания равным нулю.

Следовательно, свободная составляющая тока находится как решение дифференциального уравнения без правой части.

Карточка № 6.3

Включение катушки индуктивности под постоянное напряжение

Вопрос № 1. На основании первого закона коммутации устанавливаем, что ток в первый момент после замыкания

контактора (при $t = 0$) равен току в катушке, протекавшему до замыкания контактора.

Поскольку при $t < 0$ $i = 0$, то и при $t = 0$ $i = 0$.

Вопрос № 2. Для принужденного (установившегося) тока индуктивность L не создает сопротивления, поэтому

$$i_{\text{пр}} = \frac{U}{r} = \frac{10}{10} = 1 \text{ А.}$$

Вопрос № 3. Постоянную времени находим по формуле

$$\tau = \frac{L}{r} = \frac{0,1}{10} = 0,01 \text{ с.}$$

Вопрос № 4. Ток в цепи представляем как сумму принужденной и свободной составляющих

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = \frac{U}{r} + Ae^{-\frac{t}{\tau}} = 1 + Ae^{-100t}.$$

Вопрос № 5. Для определения постоянной интегрирования A используем начальное условие: при $t = 0$ $i = 0$ (см. ответ на вопрос № 1 этой же карточки).

Подставляя эти данные в выражение для тока, найденное выше, получаем

$$0 = A + 1,$$

откуда

$$A = -1.$$

Карточка № 6.4

Включение катушки индуктивности под переменное напряжение

Вопрос № 1. На основании первого закона коммутации устанавливаем, что ток в первый момент после замыкания контактора (при $t = 0$) равен току в катушке, протекавшему до замыкания контактора (при $t < 0$).

Поскольку при $t < 0$ цепь разорвана, $i = 0$. Следовательно, и при $t = 0$ $i = 0$.

Вопрос № 2. Принужденная составляющая тока равна току установившегося режима, который находим известными методами расчета синусоидальных токов:

$$x_L = \omega L = 100 \cdot 0,1 = 10 \text{ Ом};$$

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{10^2 + 10^2} = 10\sqrt{2} \text{ Ом};$$

$$I_m = \frac{U_m}{z} = \frac{10}{10\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ А};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r} = \frac{10}{10} = 1; \varphi = 45^\circ;$$

$$i_{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - 45^\circ).$$

Вопрос № 3. Уравнение для свободной составляющей тока не зависит от закона изменения напряжения, приложенного к цепи. Вид этого уравнения определяется конфигурацией цепи и ее параметрами. Мы рассматриваем ту же цепь, что и в предыдущем параграфе, поэтому выражение для свободной составляющей заимствуем из ответа на вопрос № 4 предыдущей карточки:

$$i_{\text{св}} = Ae^{-100t}.$$

Вопрос № 4. Ток в цепи представляем как сумму принужденной и свободной составляющих:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\sin(\omega t - 45^\circ)] + Ae^{-100t}.$$

Вопрос № 5. Подставляя в выражение для тока начальные условия, приведенные в ответе на вопрос № 1 этой карточки, получаем

$$0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(-45^\circ) + A,$$

откуда

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \sin 45^\circ = \frac{1}{2}.$$

К главе 7

1. Неправильно. При увеличении сопротивления R ток возбуждения увеличивается, следовательно, уменьшается скорость вращения двигателя.

2. Неверно. Сопротивление обмотки якоря сравнительно мало изменяется с изменением режима работы двигателя.

3. Вы ошибаетесь. Генератор последовательного возбуждения способен самовозбуждаться.

4. Неправильно. Переведите ширину щетки в метры.

5. Правильно: $c_E = pN / (60 A)$.

6. Неверно. Подумайте, как зависит мощность, потребляемая двигателем из сети, от тока в обмотке якоря.

7. Правильно.

8. Неверно. Вы перепутали направление смещения нейтрали и у генератора, и у двигателя.

9. Вы ошибаетесь. Из конструктивных соображений целесообразнее изготавливать вращающийся якорь в виде целой детали, а не набирать его из тонких листов. Это повысило бы механическую прочность якоря и упростило технологию его изготовления.

10. Неправильно. В простой петлевой обмотке число параллельных ветвей обмотки якоря равно числу полюсов машины.

11. Неверно. В двухслойной обмотке число секций равно числу пазов якоря, а число пластин коллектора – числу секций.

12. Правильно. При холостом ходе цепь обмотки возбуждения разомкнута. Ток возбуждения равен нулю при наличии ЭДС остаточного намагничивания.

13. Неверно. Помните, что с увеличением скорости вращения якоря пропорционально увеличивается ЭДС остаточного намагничивания.

14. Правильно. Критический ток может значительно превышать номинальный.

15. Неправильно. Вы перепутали рабочую и механическую характеристики.

16. Правильно: $F = B_{cp} I_1 l = 2 \cdot 10 \cdot 0,05 = 1 \text{ Н}$.

17. Неверно. Вы перечислили не все виды потерь энергии в генераторе.

18. Правильно. Полагаем $I_{\text{в}} = 0$ и находим $E_0 = 3 \text{ В}$.

19. Правильно. Переведите диаметр якоря в метры.

20. Неверно. Выбор расчетного напряжения в области насыщения магнитной системы приведет к неоправданному увеличению тока возбуждения и размеров катушек основных полюсов.

21. Неверно. Вспомните, чему равна производная синусоидальной функции.

22. Неверно. Вспомните, как зависят потери на гистерезис в сердечнике якоря от частоты его перемагничивания.

23. Правильно. У генератора параллельного возбуждения ток короткого замыкания меньше критического тока.

24. Неверно. Представьте себе мысленно или изобразите на рисунке магнитные поля полюсов и якоря и посмотрите, в какой области силовые линии направлены встречно.

25. Неверно. Найдите значение ЭДС E при $I_{\text{в}} = 0$.

26. Неверно. Принудительное охлаждение не уменьшает, а увеличивает потери энергии в машине, так как к другим видам потерь добавляются вентиляционные. Назначение охлаждающих устройств – способствовать более быстрому удалению тепла, выделяющегося вследствие потерь энергии.

27. Вы неправильно определили шаг по коллектору.

28. Неверно. Число проводников, соединенных последовательно, равно общему числу проводников, деленному на число параллельных ветвей.

29. Правильно. Направления тока якоря и потока возбуждения меняются одновременно, следовательно, вращающий момент не меняет направления.

30. Правильно: $P_1 = UI = 220 \cdot 20 = 4,4 \text{ кВт}$; $\eta = P_2 / P_1 = 3,3 / 4,4 = 0,75$.

31. Неверно. Сгорит пусковой реостат, так как он не рассчитан на работу в длительном режиме.

32. Правильно. Стабилизация скорости вращения двигателя обеспечивается при встречном включении обмоток последовательного и параллельного возбуждения.

33. Неверно. Подумайте, как изменятся механические силы взаимодействия проводников обмотки якоря с магнитным полем возбуждения при увеличении тока в обмотке.

34. Правильно. Двигатели постоянного тока серии П изготавливают на расчетное напряжение 220 или 110 В.

35. Вы ошибаетесь. Правильное решение:

$$E_1 = B_{\text{ср}} l v = 1 \cdot 0,1 \cdot 10 = 1 \text{ В}.$$

36. Правильно. Якорь может быть как ротором, так и статором.

37. Неверно. Учтите, что при холостом ходе цепь обмотки возбуждения разорвана.

38. Правильно. Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату силы тока.

39. Неверно. Это следствие реакции якоря, а не ее определение.

40. Неправильно. Это следствие реакции якоря в генераторе, магнитная система которого работает на изгибе кривой намагничивания.

41. Правильно. См. консультации № 123 и 128.

42. Неверно. Вспомните закон электромагнитной индукции.

43. Вы ошибаетесь. Вспомните условия, при которых в проводнике индуцируется ЭДС.

44. Неправильно. Вспомните, что при увеличении нагрузки напряжения генератора и равное ему напряжение возбуждения уменьшаются.

45. Неверно. Дополнительные полюсы не являются основной деталью машины. В принципе машина может работать и без них. Более того, в машине малой мощности дополнительные полюсы не устанавливаются.

46. Неправильно. Учтите, что моменты трения, потери в стали и вентиляционные потери зависят от скорости вращения двигателя.

47. Неверно. Полезную мощность следует брать в ваттах, а не в киловаттах.

48. Правильно. Вспомните, от чего зависят потери энергии в других случаях.

49. Неверно. Время коммутации определяется шириной щетки и линейной скоростью коллектора.

50. Правильно. Скорость двигателя обратно пропорциональна величине магнитного потока возбуждения.

51. Правильно. Магнитный поток добавочных полюсов пропорционален нагрузке.

52. Правильно. Чтобы этот генератор вырабатывал напряжение, ток в обмотке возбуждения должен создаваться за счет постороннего источника.

53. Неполный ответ.

54. Правильно: $E = c_E n\Phi = (115/15) \cdot 1500 \cdot 0,01 = 115 \text{ В}$.

55. Неправильно. Пока магнитопровод не насыщен, напряжение генератора с ростом нагрузки увеличивается, несмотря на увеличение реакции якоря.

56. Неверно. Пусковой реостат включается в цепь якоря, а не в цепь возбуждения.

57. Неверно. Переведите активную длину проводника в метры.

58. Неправильно. Подумайте, как зависит ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, от скорости его вращения в магнитном поле.

59. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 54.

60. Неверно. Наличие изоляционных слоев между тонкими листами несколько уменьшает эффективную площадь сечения и соответственно увеличивает (а не уменьшает) магнитное сопротивление сердечника якоря.

61. Неправильно. Потери в обмотке пропорциональны квадрату силы тока.

62. Правильно. В отличие от генератора с независимым возбуждением, в данном случае напряжение возбуждения с увеличением нагрузки уменьшается.

63. Неверно. В рассматриваемой обмотке ширина секции (первый частичный шаг) равна числу пазов якоря, приходящихся на один полюс машины, а шаг по коллектору всегда равен единице.

64. Неправильно. При отсутствии остаточного намагничивания процесс самовозбуждения невозможен.

65. Правильно. Короткозамкнутая секция Z переключается из одной параллельной ветви в другую.

66. Неверно. Это закон электромагнитной индукции в формулировке Максвелла.

67. Правильно: $y_1 = (z/2p) \pm b = 9/4 - 1/4 = 2$; $y_k = (k \pm 1)/p = (9 - 1)/2 = 4$.

68. Неверно. Переведите активную длину проводника в метры.

69. Правильно.

70. Неверно. Это не может быть характеристикой $I_2(P_2)$, так как при $P_2 = 0$ вращающий момент и ток якоря не равны нулю.

71. Правильно. С увеличением скорости вращения якоря увеличивается ЭДС остаточного намагничивания и ток короткого замыкания.

72. Неправильно. Вы не учли падения напряжения на сопротивлении якоря.

73. Неверно. Вы перепутали ограничивающие факторы.

74. Неверно. В двигателе постоянного тока имеются и другие виды потерь энергии.

75. Неправильно. Многоступенчатый пуск предназначен для уменьшения пускового тока.

76. Наоборот, условия пуска будут более легкими.

77. Правильно. Мощность $P_2 = 0$, $P_1 \neq 0$, следовательно, $\eta = 0$.

78. Неверно. Это следствие реакции якоря при наличии насыщения магнитной системы машины.

79. Неправильно. Это верхний предел КПД генераторов мощностью до 100 кВт.

80. Неверно. При полностью размагниченной магнитной системе самовозбуждение невозможно.

81. Правильно. Пусковой момент двигателя пропорционален квадрату силы пускового тока.

82. Правильно: $\eta = P_2 / (P_2 + P_1) = 8 / (8 + 2) = 0,8$.

83. Неверно. Вспомните правило левой руки.

84. Правильно. С увеличением нагрузки напряжение генератора уменьшается. Чтобы поддерживать его неизменным, следует увеличить ток возбуждения.

85. Правильно. Требования к расчетному сопротивлению щетки машины противоречивы. Это техническое противоречие разрешается оптимальным подбором материала щетки.

86. Неверно. Секция 2 принадлежит определенной параллельной ветви, ток в которой сохраняет постоянное значение.

87. Проанализируйте формулу $n \approx U / (c_E \Phi)$.

88. Вы ошибаетесь. Обратите внимание на расчетные напряжения двигателей и генераторов постоянного тока серии П.

89. Неправильно. Следует учесть, что через сопротивления R_1 и R_2 протекают токи различной величины.

90. Неверно. Для получения такой ЭДС необходимо, чтобы $I_{\text{в}} \neq 0$.

91. Неправильно. Вспомните, как зависит результирующий магнитный поток от нагрузки.

92. Неверно. Воспользуйтесь соотношением

$$c_M = 60c_E / (2\pi).$$

93. Неверно. При соблюдении требуемых условий этот генератор будет самовозбуждаться.

94. Неправильно. При отключенной нагрузке ток якоря будет небольшим, следовательно, небольшим будет и количество теплоты, выделяющееся в обмотке якоря.

95. Правильно. Большие пусковые токи опасны как для сети, так и для самого двигателя.

96. Неверно. В двухслойной обмотке число секций равно числу пазов якоря.

97. Вы ошибаетесь. Подумайте, от чего зависят механические силы взаимодействия проводников обмотки якоря с магнитным полем возбуждения.

98. Неверно. Секция 4 принадлежит определенной параллельной ветви, ток в которой сохраняет постоянное значение.

99. Грубая ошибка. Расчет производят в системе единиц СИ.

100. Неправильно. Вы нашли отношение мощности потерь к полезной мощности.

101. Неверно. Вращающуюся обмотку можно соединить с неподвижными клеммами машины при помощи медных колец и щеток.

102. Правильно. Магнитный поток главных полюсов увеличивается с ростом тока нагрузки. По мере насыщения магнитной системы рост магнитного потока замедляется, а действие факторов, размагничивающих машину, усиливается.

103. Правильно.

104. Неверно. Вспомните, что с увеличением тока якоря пропорционально увеличивается и магнитный поток возбуждения.

105. Неверно. В генераторах постоянного тока имеются и другие виды потерь энергии.

106. Правильно: $M_0 + M_2 > M$.

107. Правильно. Напряжение возбуждения всегда равно напряжению генератора.

108. Неверно. В этом случае при переключении секций пускового реостата меняется ток возбуждения.

109. Неполный ответ.

110. Неверно. Вспомните, как зависят от скорости вращения якоря потери на вихревые токи в его сердечнике.

111. Неверно. В простой петлевой обмотке шаг по коллектору всегда равен единице.

112. Вы ошибаетесь. Изменение магнитного потока возбуждения отражается на скорости вращения двигателя.

113. Неправильно. Двигатель часто работает и при нагрузках, меньших номинальной.

114. Неверно. У рассматриваемого генератора обмотка возбуждения подключена к клеммам отдельного источника питания.

115. Неверно. Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату силы тока.

116. Неправильно. У генератора физическая нейтральavorачивается в сторону вращения якоря.

117. Неверно. Воспользуйтесь формулами $y_1 = (z/p) \pm b$; $y_k = (k \pm 1) p$.

118. Неправильно. При согласном включении обмотка последовательного возбуждения компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и внутреннее падение напряжения. Поэтому напряжение генератора мало зависит от нагрузки.

119. Неверно. При прочих неизменных условиях скорость вращения двигателя пропорциональна напряжению на обмотке якоря.

120. Неверно. Обратите внимание на величину p .

121. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 196.

122. Правильно.

123. Неверно. При увеличении нагрузки тормозной момент на валу двигателя увеличится и превысит вращающий момент. Скорость вращения якоря будет уменьшаться.

124. Неправильно. У генератора параллельного возбуждения ток короткого замыкания меньше номинального тока.

125. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 148.

126. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 216.

127. Правильно. Ток возбуждения увеличивается, а скорость вращения двигателя уменьшается.

128. Неправильно. Обратите внимание на то, что при увеличенной механической нагрузке тормозной момент окажется больше вращающего.

129. Правильно.

130. Правильно: $c_M = 60c_E / (2\pi) = 60 \cdot 6,28 / (2\pi) = 60$.

131. Неверно. При рекуперации не обязательно использовать кинетическую энергию. Можно, например, использовать потенциальную энергию поднятого груза.

132. Правильно. Достигнув максимума, КПД медленно уменьшается с увеличением нагрузки. Поэтому и при номинальной нагрузке его значение достаточно велико.

133. Правильно. ЭДС, индуцируемая в каждом витке обмотки якоря, изменяется примерно по синусоидальному закону.

134. Неверно. Вращающаяся часть машины называется ротором. Ротор может быть как якорем, так и индуктором.

135. Вы ошибаетесь. Вспомните, что ток якоря в десятки раз превышает ток возбуждения.

136. Неправильно. При большом сопротивлении цепи возбуждения генератор не возбуждётся; его ЭДС близка к ЭДС холостого хода.

137. Правильно.

138. Правильно: $y_1 = (z/2p) + b = (12/4) \pm 0 = 3$; $y_k = y = 1$.

139. Правильно. Генератор смешанного возбуждения не может возбуждаться при полном размагничивании.

140. Неверно. Постоянная машины, работающей в качестве двигателя, не равна постоянной машины, работающей в качестве генератора.

141. Правильно: $n(M)$ – механическая характеристика, а $n(P_2)$ – одна из рабочих характеристик двигателя.

142. Правильно. Магнитное поле двигателя ослабляется под сбегающим краем полюса.

143. Неверно. Обратите внимание на то, что число пар параллельных ветвей равно двум, а число параллельных ветвей – четырем.

144. Правильно. Генераторы с такой характеристикой используются в качестве сварочных.

145. Неверно. Проанализируйте формулу $I_{я} = (U - E) / R_{я}$.

146. Неправильно. При независимом возбуждении генератора магнитный поток основных полюсов не зависит от тока нагрузки.

147. Правильно. Суммарные потери в двигателях мощностью до 100 кВт составляют от 8 до 25% от номинальной мощности.

148. Правильно. Для определения времени коммутации необходимо ширину щетки, выраженную в метрах, разделить на линейную скорость коллектора.

149. Правильно.

150. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 228.

151. Неверно. При отсутствии насыщения значение результирующего магнитного поля не меняется. Реакция якоря только искажает картину поля.

152. Неполный ответ. Указанная кривая может изображать и зависимость $M(P_2)$.

153. Неверно. Одна из формул выражает закон Ампера.

154. Неправильно. Вспомните, как влияет реакция якоря на результирующий магнитный поток.

155. Правильно. Скорость вращения двигателя возрастает, т.е. двигатель «идет вразнос».

156. Правильно. При постоянном напряжении питания момент на валу двигателя увеличивается с ростом полезной мощности по линейному закону.

157. В режиме холостого хода (при $P_2 = 0$) двигатель потребляет из сети некоторый ток $I_{\text{я}} \neq 0$, идущий на покрытие потерь холостого хода.

158. Из формулы $M = C_m I_{\text{я}} \Phi$ следует, что вращающий момент шунтового двигателя пропорционален току якоря.

159. Правильно. Номинальный ток и номинальное напряжение машины соответствуют перегибу характеристики холостого хода.

160. Неверно. При неправильном включении обмотки возбуждения генератор размагнитится и процесс самовозбуждения невозможен.

161. Неверно. Учтите, что при изменении направления вращения изменяется и направление ЭДС остаточного намагничивания.

162. Неправильно. Якорь будет вращаться, так как вращающий момент не меняет направления при одновременном изменении направлений тока якоря и потока возбуждения.

163. Правильно.

164. Неверно. Этот способ применим только при постоянной нагрузке.

165. Неверно. Это только часть потерь энергии, существующих в двигателе постоянного тока.

166. Неверно. Учтите, что вращающий момент больше тормозного на величину динамического момента.

167. Неполный ответ. Вы не указали щетки, без которых работа машины постоянного тока невозможна.

168. Неверно. Подумайте, как зависит ток в обмотке якоря двигателя от противо-ЭДС. Составьте уравнение второго закона Кирхгофа для цепи якоря.

169. Вы ошибаетесь. Попробуйте мысленно или на рисунке восстановить картину магнитных полей основных полюсов и якоря.

170. Неверно. Вы указали не все виды потерь в двигателе постоянного тока.

171. Неверно. Воспользуйтесь формулой $\eta = P_2 / P_1$.

172. Неправильно. Воспользуйтесь формулой $c_E = = pN/(60 a)$.

173. Неверно. Воспользуйтесь формулой $M_2 = 975(P_2 / n)$.

174. Неверно. В случае встречного включения обмоток возбуждения результирующий магнитный поток, ЭДС и напряжение генератора резко падают при увеличении нагрузки.

175. Правильно. Уменьшение магнитного поля под одним краем полюса компенсируется его увеличением под другим.

176. Неверно. При изменении направления тока возбуждения направление силовых линий магнитного поля, создаваемого этим током, меняется на противоположное. Соответственно меняется и направление сил, действующих на проводники обмотки якоря.

177. Неправильно. Пока магнитопровод не насыщен, напряжение генератора с ростом нагрузки увеличивается, несмотря на то, что растет падение напряжения внутри обмоток.

178. Правильно. Основным фактором, ограничивающим ток якоря, является противо-ЭДС.

179. Возможно, вы подставили в формулу длину окружности якоря и длину провода в сантиметрах. Переведите их предварительно в метры.

180. Правильно. В генераторе магнитное поле ослабляется под набегающим краем полюса, который на рисунке обозначен буквой б.

181. Неверно. При многоступенчатом пуске двигателя время увеличивается, а не уменьшается.

182. Правильно: $U = E - IR_{\text{я}} = 240 - 100 \cdot 0,1 = 230 \text{ В}$.

183. Неверно. Прочтите консультацию № 82.

184. Неверно. Воспользуйтесь формулой $U = E - IR_{\text{я}}$.

185. Правильно. Формула записана для прямолинейного проводника, расположенного в равномерном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям.

186. Вы ошибаетесь. Посмотрите консультацию № 54.

187. Неправильно. В формулу подставляют радиус якоря. Если в формуле указывают диаметр якоря, то следует брать число проводников, расположенных на половине его окружности.

188. Неверно. Это выражение определяет магнитную индукцию равномерного поля. Если поле неравномерно, выражение позволяет найти только среднее значение магнитной индукции.

189. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 35.

190. Неправильно. Это только часть потерь энергии в генераторе.

191. Неверно. У генератора под набегающим краем полюса магнитное поле ослабляется, под сбегающим – усиливается.

192. Неверно. Первая формула определяет значение магнитного потока, сцепленного с контуром площадью S , вторая формула – закон Ампера.

193. Неверно. Вы перепутали характеристики двигателя.

194. Проанализируйте формулу $M = C_m I_{\text{я}} \Phi$.

195. Неверно. В каждом витке обмотки индуцируется ЭДС, которая изменяется по величине и направлению в соответствии с синусоидальным законом.

196. Вы ошибаетесь. Правильное решение:
 $\eta = P_2 / (P_2 + P_{\text{п}}) = 90 / (90 + 10) = 0,9$.

197. Неверно. В режиме холостого хода двигателя (при $P_2 = 0$) вращающий момент M не равен нулю.

198. Неправильно. Рассчитывать машину таким образом нецелесообразно, так как при основных режимах ее работы КПД оказался бы заниженным.

199. Неверно. Посмотрите консультацию № 210.

200. Вы ошибаетесь. Дело не в сложности определения физической нейтральной машины, а в колебаниях ее положения при изменении нагрузки.

201. Правильно.

202. Правильно. Этот способ экономичен, так как через сопротивление $R_{\text{б}}$ протекает сравнительно небольшой ток возбуждения двигателя.

203. Неверно. Учтите, что производная постоянной функции равна нулю.

204. Правильно. Потери на гистерезис пропорциональны скорости, а потери на вихревые токи – квадрату скорости вращения якоря.

205. Правильно. Реакция якоря уменьшит результирующий магнитный поток генератора.

206. Неверно. Проанализируйте формулу
 $n = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / (c_E \Phi)$.

207. Вы ошибаетесь. Анализ уравнения моментов двигателя позволяет ответить на вопрос.

208. Правильно. При построении механической характеристики двигателя в качестве независимой переменной берут момент, а при построении рабочих характеристик – мощность на валу двигателя.

209. Неправильно. Вспомните определение и примерный вид механической и рабочих характеристик двигателя постоянного тока.

210. Неверно. Тип обмотки определяется расчетными токами и напряжениями машин постоянного тока независимо от их назначения.

211. Правильно. Петлевые обмотки позволяют получить большое число параллельных ветвей и при большом общем токе уменьшить нагрузку на отдельный щеточный контакт.

212. Правильно. Процесс самовозбуждения возможен при любой скорости вращения якоря.

213. Неверно. В машине с независимым возбуждением магнитный поток основных полюсов не зависит от нагрузки, а результирующий магнитный поток зависит.

214. Неправильно. Вспомните, что встречное включение обмоток последовательного и параллельного возбуждения необходимо для поддержания постоянства скорости вращения при изменении нагрузки.

215. Неверно. У генератора самовозбуждения магнитный поток основных полюсов и результирующий магнитный поток зависят от нагрузки.

216. Неправильно. Динамический момент помогает вращающему преодолеть тормозные моменты. Это бывает, когда скорость вращения уменьшается.

217. Правильно. Пусковой реостат рассчитан на кратковременную работу.

218. Неверно. Вспомните примерный вид внешней и регулировочной характеристик генератора с независимым возбуждением.

219. Неправильно. Учтите, что при изменении полярности полюсов меняется и направление тока в обмотке якоря.

220. Неверно. Воспользуйтесь формулами

$$P_1 = UI; \quad \eta = P_2 / P_1 \quad .$$

221. Правильно: $\eta = P_2 / P_1 = 45/50 = 0,9$.

222. Вы ошибаетесь. Учтите, что при неизменной скорости вращения якоря двигателя, изменив полярность полюсов машины, необходимо изменить и направление тока в обмотке якоря.

223. Неверно. Это закон электромагнитной индукции в формулировке Фарадея.

224. Неправильно. Прочтите консультацию № 226.

225. Неверно. Потери в обмотке якоря существенным образом зависят от тока.

226. Правильно. Силы, действующие на проводники и вращающий момент двигателя, пропорциональны току в обмотке якоря (закон Ампера).

227. Неверно. Минимально допустимое сопротивление щетки ограничено максимально допустимым током в короткозамкнутой секции.

228. Правильно: $B_{cp} = 2\rho\Phi/(\pi D l) = 4 \cdot 0,01/0,4 \cdot 0,1 = 1(\text{В} \cdot \text{с})/\text{м}^2 = 1 \text{ Тл}$.

229. Правильно. Зависимости $M(P_2)$ и $I_{я}(P_2)$ имеют один и тот же характер.

230. Неверно. Для ответа на поставленные вопросы достаточно знать число пазов якоря и количество слоев обмотки в пазу.

231. Неполный ответ. Указанная кривая может изображать и зависимость $I_{я}(P_2)$.

232. Вы ошибаетесь. Проанализируйте формулу $M_2 = 975 P_2 / n$; учитывая, что $975 \approx 10^3$.

233. Правильно: $M = F(D/2) N = 1 \cdot (0,05/2) \cdot 200 = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

234. Правильно. При уменьшении механической нагрузки на валу уменьшается ток якоря, а следовательно, и равный ему ток возбуждения. При этом скорость двигателя резко возрастает.

235. Неполный ответ. Если витки укладывать в одни и те же пазы сердечника якоря, пульсации напряжения на зажимах не уменьшатся.

236. Правильно.

237. Неверно. вспомните, что в режиме холостого хода $P_2 = 0$.

238. Неправильно. Вы перепутали области применения петлевых и волновых обмоток.

239. Неверно. Выбор расчетного напряжения на линейном участке характеристики холостого хода (кривой намагничивания стали) приведет к существенному увеличению размеров и массы магнитной системы проектируемого генератора.

240. Правильно: $E_0 = c_E n \Phi_0$.

241. Правильно. У шунтового двигателя параллельного возбуждения вращающий момент пропорционален току якоря.

242. Правильно. При уменьшении сопротивления R_1 увеличивается магнитный поток возбуждения; при уменьшении сопротивления R_2 увеличивается напряжение на обмотке якоря.

243. Правильно. Ток возбуждения не зависит от сопротивления пускового реостата; при переключении секций пускового реостата цепь якоря не разрывается.

244. Неверно. Концы секций обмотки якоря крепятся (припаиваются) к коллекторным пластинам. Но основное назначение коллектора не в этом.

245. Неполный ответ.

246. Неверно. Генераторы постоянного тока серии П изготавливают на расчетное напряжение 115 или 230 В.

247. Правильно. У генераторов физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, у двигателей – против.

248. Неверно. У двигателей физическая нейтраль смещается противоположно направлению вращения якоря.

249. Неправильно. Скорость вращения двигателя будет быстро увеличиваться.

250. Неверно. Смотрите консультацию № 6.

251. Неправильно. У этого генератора обмотки якоря и возбуждения соединены последовательно: $I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$.

252. Правильно. Число секций обмотки равно числу пазов якоря, а число пластин коллектора – числу секций.

253. Неверно. Пусковой реостат изготавливается ступенчатым, так как через него проходят большие пусковые токи. При переключении с одной ступени на другую цепь якоря размыкается, возникает сильное искрение (дуговой разряд), в результате чего подгорают контакты.

254. Правильно. Скорость вращения двигателя пропорциональна напряжению на обмотке якоря.

255. Неверно. Помните, что магнитный поток главных полюсов создается током нагрузки.

256. Правильно. Щетки должны быть смещены за физическую нейтраль, положение которой меняется с изменением нагрузки.

257. Правильно. При изменении направления вращения якоря меняется направление ЭДС остаточного намагничивания и генератор полностью размагничивается.

258. Неверно. Если независимой переменной является мощность на валу двигателя P_2 , то это рабочая характеристика.

259. Правильно. Магнитный поток серийной обмотки компенсирует действие факторов, снижающих напряжение.

260. Правильно. При рекуперации энергии одна и та же машина работает то в режиме двигателя, то в режиме генератора.

261. Правильно: $E = E_1 (N/2a) = 1 \cdot (460/2 \cdot 2) = 115$ В.

262. Неверно. Число пластин коллектора равно числу пазов якоря.

263. Правильно. Напряжение генератора начнет уменьшаться только тогда, когда произойдет насыщение магнитопровода.

264. Неверно. У этого генератора две обмотки возбуждения.

265. Неправильно. Зависимость скорости n от момента M является механической характеристикой двигателя.

266. Неверно. Примените закон Ампера к проводникам обмотки якоря и определите, как зависит вращающий момент двигателя от тока.

267. Неправильно. Генератор смешанного возбуждения может самовозбуждаться.

268. Правильно.

269. Неверно. Потери на вихревые токи в сердечнике якоря существенным образом зависят от скорости его вращения.

270. Вы перепутали характеристики.

271. Правильно. Набирая якорь из тонких листов, электрически изолированных друг от друга, увеличивают сопротивление вихревым токам и тем самым уменьшают тепловые потери в машине, пропорциональные квадрату силы тока.

272. Правильно. Это основные детали, которые принципиально необходимы для преобразования энергии в машине и ее включения в электрическую сеть постоянного тока.

273. Неверно. Анализ приведенного уравнения позволяет ответить на этот вопрос.

274. Правильно: $M_2 = 975(P_2 / n) = 975 (5/975) = 5$ кг · м.

275. Неверно. Это внешняя характеристика генератора независимого возбуждения.

276. Вы ошибаетесь. Коммутируется та секция, которая замкнута накоротко щеточным контактом.

277. Неверно. Результирующий магнитный поток по мере роста нагрузки увеличивается, достигает максимального значения, а затем уменьшается.

278. Вы ошибаетесь. Прочтите консультацию № 30.

279. Неправильно. Проанализируйте формулу $n = (U - I_{\text{я}}R_{\text{я}})/(c_E\Phi)$. Вспомните, что магнитный поток пропорционален току возбуждения, который в свою очередь обратно пропорционален величине сопротивления $R_{\text{л}}$.

280. Неверно. Можно создать такую машину, которая не перегревалась бы и при естественном охлаждении. Принудительное охлаждение не защищает машину от перегрева, если ее нагрузка значительно превышает номинальную.

281. Правильно. При переходе проводника обмотки якоря из зоны влияния одного полюса в зону влияния другого ток в проводнике меняет направление. Необходимо выпрямительное устройство, которое сохранило бы направление тока в нагрузке неизменным.

282. Правильно. Применяя второй закон Кирхгофа, получим $I_{\text{я}} = (U - E)/R_{\text{я}}$, где U – напряжение на зажимах двигателя; E – ЭДС в обмотке якоря (противо-ЭДС); $R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи обмотки якоря. Из формулы очевидно, что с уменьшением ЭДС E ток $I_{\text{я}}$ увеличивается, а следовательно, увеличивается и потребляемая из сети мощность обмотки якоря $P = UI_{\text{я}}$.

К главе 8

1. Правильно. Выучите наизусть правила соединения обмоток генератора в звезду и треугольник.

2. Правильно. Векторы \bar{U}_{CA} и \bar{U}_{AC} имеют противоположные знаки (направлены в противоположные стороны). Следовательно, $\bar{U}_{AC} = -\bar{U}_{CA} = -(\bar{U}_C - \bar{U}_A) = \bar{U}_A - \bar{U}_C$.

3. Неверно. Трехфазный двигатель, обмотки которого рассчитаны на 127 В, можно включить в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Обмотки двигателя следует соединить звездой.

4. Правильно. При неизменных сопротивлениях нагрузки линейные токи, которые в рассматриваемом случае равны фазным токам, могут измениться только за счет изменения фазных напряжений.

5. Неверно. Вы подсчитали активную мощность одной фазы трехфазной цепи. При симметричной нагрузке для получения правильного ответа эту мощность следует утроить.

6. Неверно. См. консультацию № 64.

7. Правильно: $\cos \varphi = P/S = 0,5$.

8. Правильно. При изменении направления вращения рамок знаки начальных фаз индуктированных ЭДС изменяются на противоположные. При этом изменяется порядок следования фаз.

9. Неверно. Фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раза.

10. Правильно. При соединении нагрузки треугольником фазный ток в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного.

11. Правильно. При соединении треугольником каждая обмотка двигателя будет находиться под линейным напряжением 220 В, равным ее номинальному (расчетному) напряжению. При пуске короткозамкнутых асинхронных двигателей с целью ограничения пусковых токов применяется способ переключения обмоток с треугольника на звезду. В этом случае линейный ток, потребляемый двигателем из сети, уменьшается в 3 раза. При этом уменьшается в 3 раза и пусковой момент.

12. Правильно. Действующее значение векторной суммы равно сумме действующих значений токов только в том случае, когда векторы токов совпадают по направлению.

13. Неверно. В том случае, когда известны линейное напряжение и линейный ток, активную мощность симметричной трехфазной цепи независимо от схемы соединения нагрузки рассчитывают по формуле $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \times \times 220 \cdot 5 \cdot 0,8 = 1520 \text{ Вт}$.

14. Неверно. Учтите, что к нулевой точке генератора может быть подсоединен соединительный провод.

15. Неправильно. Напряжения, измеренные между любым зажимом (A, B, C) и нулевой точкой нагрузки, являются фазными напряжениями. Следовательно, напряжение U_{A0} не линейное, а фазное.

16. Вы ошибаетесь. При соединении нагрузки треугольником фазные напряжения равны линейным, следовательно, лампы окажутся под напряжением 220 В. Известно, что лампы накаливания очень чувствительны к перенапряжениям: даже небольшое превышение номинального напряжения резко сокращает срок службы таких ламп.

17. Неверно. Амплитуда индуцированной ЭДС увеличивается при увеличении скорости вращения рамки, но начальная фаза не меняется и определяется пространственным положением рамки относительно магнитного поля при $t = 0$.

18. Вы ошибаетесь. В случае симметричной нагрузки ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи равен нулю. Поэтому обрыв нулевого провода не скажется на значениях линейных токов.

19. Неправильно. При соединении нагрузки треугольником фазные напряжения равны линейным.

20. Неправильно. См. консультацию № 93.

21. Неверно. В том случае, когда известны линейный ток и линейное напряжение, реактивная мощность симметричной трехфазной цепи $Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 5 \cdot 0,6 = = 1140 \text{ ВАр}$.

22. Правильно. Полярная диаграмма может быть получена из топографической и наоборот, топографическая – из полярной за счет параллельного переноса векторов, допускаемого правилами векторной алгебры.

23. Вы ошиблись в выборе знаков.

24. Неверно. При соединении ламп звездой каждая из них окажется под напряжением в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного. Поскольку лампы рассчитаны на напряжение 220 В, они будут гореть вполнакала. Кроме того, осветительная нагрузка,

как правило, несимметрична, поэтому для обеспечения симметрии фазных напряжений необходим нулевой провод.

25. Неправильно. См. консультацию № 95.

26. Вы ошибаетесь. Точки 0 и 0' соединены нулевым проводом, поэтому разность потенциалов этих точек равна падению напряжения на нулевом проводе.

27. Неверно. Для подсчета реактивной мощности трехфазной цепи воспользуйтесь формулой $Q = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi$.

28. Неверно. Шесть проводов требуется в несвязанной трехфазной цепи.

29. Правильно. При соединении звездой фазный и линейный токи равны между собой, так как протекают в одной и той же ветви электрической цепи.

30. Неправильно. Лампы накаливания, рассчитанные на напряжение 127 В, можно включить в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В, соединив их по схеме звезда с нулевым проводом.

31. Неверно. Начальные фазы ЭДС не зависят от скорости вращения рамок и определяются пространственным положением рамок относительно магнитного поля при $t = 0$.

32. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 60.

33. Вы ошибаетесь. Напишите векторные уравнения, связывающие векторы диаграммы, и проверьте, совпадают ли они с уравнениями первого закона Кирхгофа, написанными для рассматриваемой электрической цепи.

34. Неверно. В симметричной трехфазной системе ток в нулевом проводе равен нулю.

35. Неверно. Реактивную мощность симметричной трехфазной сети определяют по формуле $Q = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \sin \varphi$.

36. Неправильно. Обратите внимание на то, что топографическая векторная диаграмма может быть получена из полярной путем параллельного переноса векторов.

37. Неверно. Вспомните правило знаков, используемое при записи уравнений по первому закону Кирхгофа.

38. Вы ошибаетесь. Если обмотки рассматриваемого двигателя соединить треугольником, то каждая из них окажется под линейным напряжением 380 В. Поскольку обмотки двигателя рассчитаны на 127 В, двигатель будет перегреваться.

39. Неверно. Разность потенциалов между этими точками равна нулю только в том случае, когда ток в нулевом проводе отсутствует.

40. Правильно: $P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 5 \cdot 0,8 = 2640$ Вт.

41. Неправильно. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи равен нулю.

42. Неверно. Вначале необходимо найти полную мощность цепи $S = \sqrt{3} UI$. Затем можно определить коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$.

43. Правильно. При изменении направления вращения рамок изменится в соответствии с законом электромагнитной индукции направление (знак) индуцированных ЭДС. Кроме того, угловая скорость вращения ω отрицательна:

$$e'_A = -E_m \sin(-\omega t) = E_m \sin \omega t; \quad e'_B = -E_m \sin(-\omega t - 120^\circ) =$$

$$= E_m \sin(\omega t + 120^\circ); \quad e'_C = -E_m \sin(-\omega t + 120^\circ) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ).$$

Сравнивая исходные и полученные выражения, замечаем, что знаки начальных фаз изменились на противоположные.

44. Вы ошибаетесь. Фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раза.

45. Правильно.

46. Правильно. При соединении треугольником лампы во всех фазах будут находиться под линейным напряжением 220 В.

47. Неверно. Действующее значение рассматриваемой векторной суммы равно сумме действующих значений токов в случае, когда токи совпадают по фазе.

48. Правильно. При несимметричной нагрузке в нулевом проводе течет ток I_0 . Падение напряжения на нулевом проводе $I_0 R_0$ пропорционально сопротивлению нулевого провода. Чтобы точки 0 и 0' на топографической диаграмме совместились, сопротивление нулевого провода должно быть малым.

49. Правильно: $Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 5,06 = 1980$ ВАр.

50. Неверно. С началом второй соединяют конец первой обмотки.

51. Правильно. Напряжения, измеренные между жабми A, B, C , т.е. между проводами линии электропередачи, называют линейными, а напряжения между любым жабмом (A, B, C) и нулевой точкой нагрузки называют фазными напряжениями.

52. Правильно. При соединении звездой каждая из обмоток находится под расчетным напряжением 127 В. Нулевой провод необязателен, так как обмотки трехфазного двигателя образуют нагрузку, при которой симметрия фазных напряжений не нарушается.

53. Правильно. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, поэтому обрыв этого провода никак не скажется на режиме работы электрической цепи. При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю, поэтому обрыв нулевого провода приводит к такому перераспределению линейных токов, при котором их геометрическая сумма становится равной нулю

54. Неверно. При соединении нагрузки треугольником фазный ток в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного.

55. Правильно. Векторная сумма трех векторов, равных по величине и повернутых один относительно другого на 120° , равна нулю. Это можно проверить графическим построением.

56. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 13.

57. Неверно. При указанных условиях линейные токи изменяются только за счет изменения (перераспределения) фазных напряжений. При этом линейные напряжения изменяются незначительно.

58. Неправильно. Вы нашли полную мощность одной фазы трехфазной цепи.

59. Неверно. Нарисуйте две векторные диаграммы, на которых начальные фазы векторов отличаются только знаками, и убедитесь, что при этом меняется порядок следования фаз.

60. Неправильно. Геометрическая сумма линейных токов равна току в нулевом проводе. Если нулевой провод отсутствует, геометрическая сумма линейных токов равна нулю.

61. Правильно.

62. Неверно. Векторы \bar{U}_{CA} и \bar{U}_{AC} направлены встречно, следовательно, имеют разные знаки.

63. Неправильно. Если обмотки трехфазного двигателя соединить звездой, то каждая из них окажется под фазным напряжением $U_\phi = 220$ В. По условию задачи обмотки двигателя рассчитаны на 127 В, следовательно, двигатель будет перегреваться.

64. Вы ошибаетесь. Токи I_1 и I_2 равны между собой, так как протекают в одной и той же ветви электрической цепи. Однако принято различать эти токи: ток I_1 называют линейным, так как он протекает в проводе линии электропередачи, ток I_2 – фазным, так как он протекает в фазе нагрузки.

65. Вы ошибаетесь. Воспользуйтесь формулой $\cos \varphi = P/S$.

66. Правильно. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи равен нулю.

67. Неверно. Вы определили активную мощность.

68. Правильно. В многофазных цепях фазой называют и угол, определяющий мгновенное значение синусоидальной величины и часть самой электрической цепи.

69. При симметрии фазных напряжений точки 0 и 0' на топографической диаграмме совмещены и потенциалы этих точек равны между собой. При несимметричной нагрузке, когда в нулевом проводе есть ток, падение напряжения, близкое к нулю, может быть получено только при очень малом сопротивлении нулевого провода.

70. Неверно. Вы нашли активную мощность трехфазной цепи. Для подсчета реактивной мощности воспользуйтесь формулой $Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi$.

71. Неправильно. См. консультацию № 53.

72. Неверно. При соединении нагрузки треугольником фазные напряжения равны линейным.

73. Неверно. При изменении направления вращения рамок изменяются знаки индуктированных в них ЭДС. Кроме того, угловая скорость становится отрицательной.

74. Неправильно. При соединении звездой фазное напряжение не равно линейному.

75. Неверно. При соединении звездой концы обмоток объединяются в одной точке, а начала подводятся к клеммовой колодке машины.

76. Вы ошибаетесь. При наличии нулевого провода будет обеспечена симметрия фазных напряжений при несимметрии осветительной нагрузки, однако каждая из ламп окажется под фазным напряжением, которое в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального напряжения. Лампы будут гореть вполнакала.

77. Неверно. При симметричной нагрузке нет необходимости присоединять провод к нулевой точке генератора.

78. Вы ошибаетесь. Напряжения, измеренные между зажимами A, B, C , т.е. между проводами линии электропередачи, называют линейными напряжениями. Следовательно, напряжение U_{BC} не фазное, а линейное.

79. Неверно. Лампы с номинальным напряжением 127 В можно включить в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. В качестве схемы соединения ламп следует выбрать звезду с нулевым проводом.

80. Неверно. Действующее значение рассматриваемой векторной суммы всегда меньше суммы действующих значений токов.

81. Неверно. Воспользуйтесь формулой $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi$.
82. Неверно. Если пренебречь незначительным падением напряжения в обмотках генератора и проводах линии, то можно считать, что линейные напряжения на нагрузке равны напряжениям на зажимах генератора и при неизменных векторах ЭДС генератора практически не меняются. Следовательно, изменение линейных токов происходит по другой причине.
83. Вы ошибаетесь. Фазный ток равен линейному при соединении нагрузки звездой.
84. Неверно. См. консультацию № 43.
85. Правильно: $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$.
86. Вы ошибаетесь. Обмотки соединены треугольником.
87. Неправильно. При соединении звездой каждая обмотка двигателя окажется под фазным напряжением $U_{\phi} = 127 \text{ В}$. Поскольку обмотки двигателя рассчитаны на напряжение 220 В, двигатель будет работать при пониженном токе, развивая неполную мощность. Переключение обмоток с треугольника на звезду применяется при пуске короткозамкнутых асинхронных двигателей с целью ограничения пусковых токов.
88. Неверно. С концом второй соединяют начало третьей обмотки.
89. Вы ошибаетесь. Полагаем, что вектор \vec{U}_{AC} направлен навстречу вектору \vec{U}_{CA} . Следовательно,

$$\vec{U}_{AC} = -\vec{U}_{CA} = -(\vec{U}_C - \vec{U}_A).$$
90. Неправильно. Если обмотки двигателя соединить треугольником, то каждая из них окажется под линейным напряжением 220 В. Поскольку обмотки двигателя рассчитаны на 127 В, они будут перегреваться.
91. Вы ошибаетесь. Ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи равен нулю только при симметричной нагрузке и в некоторых частных случаях при определенных соотношениях фазных токов.
92. Неверно. Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S = P / \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} = 380 / \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 2 = 0,5$.
93. Правильно. В соответствии с первым законом Кирхгофа для цепи переменного тока ток в нулевом проводе всегда равен векторной сумме фазных токов. При отсутствии или обрыве нулевого провода ток в нулевом проводе равен нулю, следовательно, и сумма фазных токов равна нулю.
94. Правильно. См. консультации № 21 и 35.

95. Неправильно. Примите во внимание, что термин «фаза» определяет два различных понятия: аргумент синуса угла и часть электрической цепи.

96. Правильно. Разность потенциалов точек 0 и $0'$ равна падению напряжения в нулевом проводе.

97. Неверно. Вы определили реактивную мощность одной фазы трехфазной цепи. Для того чтобы найти реактивную мощность трехфазной цепи, полученную цифру следует утроить.

98. Правильно. Угловая частота тока, индуктируемого в рамке, равна угловой скорости вращения рамки. Амплитуда индуктируемой ЭДС прямо пропорциональна скорости вращения рамки.

99. Вы ошибаетесь. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, поэтому обрыв нулевого провода никак не скажется на значениях линейных токов. В случае несимметричной нагрузки сумма векторов линейных токов равна вектору тока в нулевом проводе. При обрыве нулевого провода эта сумма становится равной нулю, следовательно, линейные токи должны измениться так, чтобы их векторная сумма стала равной нулю.

100. Правильно. При соединении нагрузки треугольником фазные и линейные напряжения равны.

101. Неверно. Обратите внимание на то, что полярная векторная диаграмма может быть получена из топографической путем параллельного переноса векторов.

102. Правильно. Алгебраическая сумма токов в каждом из трех узлов A , B , C равна нулю. При этом токи, направленные к узлу, считают положительными, направленные от узла – отрицательными.

103. Правильно. Если обмотки двигателя соединить звездой, то каждая обмотка окажется под фазным напряжением $U_{\phi} = 220$ В. Если обмотки двигателя соединить треугольником, то каждая обмотка будет находиться под линейным напряжением 380 В. Поскольку обмотки рассматриваемого двигателя рассчитаны на напряжение 127 В, то как в первом, так и во втором случаях двигатель будет перегреваться.

104. Правильно.

105. Вы перепутали фазный и линейный токи. См. консультацию № 64.

106. Правильно. Схема соединения ламп звездой с нулевым проводом обеспечивает номинальное напряжение 127 В на каждой лампе. При этом сохраняется симметрия фазных напряжений в случае несимметричной нагрузки.

К главе 9

1. Правильно: $s_{\text{онт}} = R_2 / x_{2н} = 10\%$.
2. Вы ошиблись в вычислениях. См. консультацию № 14.
3. Неверно. Потери не уменьшаются, так как масса магнитопровода при заданных значениях магнитной индукции сохраняется прежней.
4. Правильно.
5. Неверно. Пусковой момент, действующий на неподвижный ротор в пульсирующем магнитном поле, равен нулю.
6. Правильно. Магнитные силовые линии выходят из северного полюса.
7. Вы ошибаетесь. Направление вращения результирующего магнитного поля можно изменить простыми переключениями в схеме питания катушек.
8. Неправильно. Чем больше механическая нагрузка на валу двигателя, тем медленнее вращается ротор. При этом скорость пересечения стержней обмотки магнитными силовыми линиями увеличивается.
9. Неверно. Четырехполюсное вращающееся магнитное поле повернется на 180° за полный период тока.
10. Правильно. Скорость вращения двухполюсного вращающегося магнитного поля, найденная при решении предыдущей задачи, равна 2850 об/мин. Скорость вращения шестиполюсного магнитного поля в 3 раза меньше.
11. Для получения максимального пускового момента необходимо, чтобы при $s = 1$ активное сопротивление обмотки ротора равнялось ее индуктивному сопротивлению, для чего активное сопротивление следует увеличить в 10 раз.
12. Неверно. Проанализируйте формулу

$$I_2 = E_{2н} / \sqrt{(R_2 / s)^2 + x_{2н}^2}.$$

13. Неправильно. Статор синхронного двигателя устроен точно так же, как статор асинхронного двигателя.

14. Правильно:

$$I_2 = E_{2н} / \sqrt{R_2^2 + x_{2н}^2} = 100\sqrt{2} / \sqrt{10^2 + 10^2} = 10 \text{ А}.$$

15. Правильно.
16. Правильно. Нецелесообразно большой ток нагрузки генератора пропускать через скользящие контакты.
17. Правильно: $p = 60f / n_1 = 60 \cdot 50 / 3000 = 1$.
18. Правильно: $f_2 = p(n_1 - n_2) / 60 = 1 \cdot 60 / 60 = 1$ Гц.
19. Правильно. Снимая характеристики при понижении напряжения, номинальное напряжение устанавливаем при холостом ходе; снимая характеристики при повышении напряжения, номинальное напряжение устанавливаем при номинальной нагрузке.
20. Неверно. Ток в обмотке ротора увеличится. Подумайте, почему.
21. Правильно. Если тормозной момент превысит максимальный вращающий момент двигателя, то ротор остановится.
22. Неправильно. Учтите, что одна катушка трехфазной обмотки является пусковой и в создании вращающего момента при рабочих режимах двигателя не участвует.
23. Неверно. Основной частью асинхронного двигателя является обмотка статора, без которой нельзя получить вращающееся магнитное поле.
24. Неправильно. См. консультацию № 41.
25. Правильно.
26. Правильно. Скорость вращения ротора $n_2 = (1 - s) \times 60f / p = (1 - 0,05)60 \cdot 50 / 1 = 2850$ об/мин.
27. Правильно: $f = pn / 60 = 1 \cdot 3000 / 60 = 50$ Гц.
28. Правильно. При $s = 0$ ротор вращается со скоростью магнитного поля. Вращающий момент равен нулю. При $s = 1$ ротор неподвижен. При этом вращающий момент равен пусковому.
29. Правильно. Вращающий момент не линейно зависит от скольжения, так как при изменении скольжения изменяется не только ток в обмотке ротора, но и угол сдвига фаз между ЭДС и током ротора.
30. Правильно.
31. Неверно. Воспользуйтесь формулой $f_2 = sf_1$.
32. Правильно.
33. Правильно: скорость ротора уменьшится, скольжение увеличится.
34. Правильно.
35. Неверно. При равных условиях четырехполюсное магнитное поле вращается в 2 раза медленнее двухполюсного.

36. Вы ошибаетесь. Вспомните, как связана угловая скорость вращения результирующего поля с частотой переменного тока.

37. Правильно.

38. При $s = 0,5$ сумма равна 25, при $s = 0,75$ сумма меньше.

39. Правильно. В синхронном двигателе контактные кольца и щетки предназначены для питания постоянным током обмотки ротора. Если ротор представляет собой постоянный магнит, контактные кольца и щетки не нужны.

40. Неверно. Воспользуйтесь формулой $f = pn/60$.

41. Правильно. Максимальный момент нагрузки на валу, при котором ротор не остановится, равен опрокидывающему моменту, т.е. $2N \cdot m$.

42. Неверно. Пусковому моменту двигателя соответствует $s = 1$.

43. Неправильно. Ротор вращается со скоростью $n_2 = n_1 = 60f/p$.

44. Правильно: $\operatorname{tg} \varphi_2 = x_2 / R_2 = sx_{2н} / R_2$. По мере раскручивания ротора скольжение s уменьшается, а следовательно, уменьшается и угол сдвига фаз φ_2 .

45. Неверно. Эта скорость равна нулю при $n_2 = n_1$.

46. Правильно. Изменение числа пар полюсов производится при помощи переключения секций обмотки статора.

47. Правильно. Максимальное значение вращающего момента двигателя не зависит от активного сопротивления обмотки ротора.

48. Неверно. Вспомните, какими характеристиками обладает магнитное поле двух катушек, расположенных под углом 90° в двухфазной системе.

49. Неверно. Чем меньше нагрузка двигателя, тем больше скорость ротора и тем меньше она отличается от скорости поля.

50. Правильно. Регулируемыми реостатами изменяется сопротивление цепи обмотки ротора, а следовательно, и скольжение двигателя.

51. Неверно. При оптимальном скольжении $x_2 = R_2$. Следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора следует уменьшить в 10 раз. Для этого скольжение, равное единице, также необходимо уменьшить в 10 раз.

52. Правильно. Если ротор вращается со скоростью магнитного поля, то прекращается пересечение стержней об-

мотки силовыми линиями магнитного поля. При этом в обмотке ротора не будет индуцироваться ЭДС.

53. Неверно. Учтите, что по мере раскручивания ротора скольжение уменьшается, следовательно, уменьшается и пропорциональное ему индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора x_2 .

54. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 107.

55. Правильно. Полностью устранить тормозные моменты трения невозможно, а чтобы их преодолеть, в обмотке ротора должны индуцироваться токи.

56. Неверно. Вращающий момент равен нулю при $s = 0$.

57. Правильно. Если ротор с трехфазной обмоткой закрепить неподвижно, то асинхронный двигатель можно использовать в качестве трансформатора.

58. Правильно.

59. Вы ошиблись. Определите скорость вращения магнитного поля.

60. В режиме холостого хода сохраняется трение. Поэтому $n_2 \neq n_1$.

61. Неверно. Угловая скорость вращения результирующего магнитного поля равна угловой частоте двухфазного тока ω .

62. Правильно: нет экономичных устройств для изменения частоты питающего тока.

63. Неправильно. Учтите, что скорость ротора изменится.

64. Неверно. Примите во внимание, что характеристика а снята при емкостной нагрузке генератора.

65. Неверно. Скорость пересечения силовыми линиями вращающегося магнитного поля стержней обмотки неподвижного ротора максимальна.

66. Правильно. Ротор синхронного двигателя представляет собой магнит (электромагнит), поэтому в синхронном двигателе для возникновения вращающего момента нет необходимости в скольжении.

67. Неправильно. Воспользуйтесь формулой

$$s_{\text{онт}} = (R_2 / x_{2\text{н}}) \cdot 100\%.$$

68. Правильно: $s = (n_1 - n_2) / n_1 = [(3000 - 2940) / 3000] \times 100\% = 2\%$.

69. Неверно. См. консультацию № 114.

70. Правильно. При $s = s_{\text{онт}}$ вращающий момент имеет максимальное значение. При этом участок кривой

$M_{вр} = f(s)$ от 0 до $s_{опт}$ соответствует устойчивым режимам работы двигателя, а участок от $s_{опт}$ до 1 – неустойчивым.

71. Вы ошиблись в вычислениях.

72. Правильно. При указанных в задаче условиях образуется четырехполюсное вращающееся магнитное поле, у которого $p = 2$. Скорость вращения поля $n_1 = 60 f / p = 60 \times \times 500 / 2 = 15\ 000$ об/мин.

73. Неверно. В трехфазной системе токи сдвинуты по фазе на 120° .

74. Неправильно. Короткозамкнутые обмотки асинхронных двигателей малой и средней мощности часто изготавливают из алюминия. Однако фазные и короткозамкнутые обмотки мощных двигателей в большинстве случаев делают медными.

75. Неверно. При синхронной скорости короткозамкнутая обмотка ротора не создает вращающего момента.

76. Правильно. По мере увеличения скорости вращения ротора пусковые реостаты выводят, чтобы уменьшить потери на их нагрев.

77. Неверно. При наличии скольжения частота тока в обмотке ротора не равна частоте тока в обмотке статора.

78. Правильно.

79. Правильно. При рассмотренных условиях сумма периодически изменяющихся магнитных полей представляет собой магнитное поле с постоянной по величине магнитной индукцией.

80. Правильно. На неподвижный ротор в пульсирующем магнитном поле действуют два равных и противоположно направленных момента.

81. Правильно: $f_2 = s f_1 = 0,02 \cdot 50 = 1$ Гц.

82. Правильно.

83. Неправильно. Зазоры для охлаждающего воздуха предусматриваются в двигателе независимо от конструкции ротора.

84. Неверно. В двухфазной системе угол сдвига фаз между токами равен 90° .

85. Вы перепутали способы снятия характеристик.

86. Неверно. Скорость вращения ротора относительно скорости вращения магнитного поля 60 об/мин, а не 60 об/с.

87. Правильно. Для изменения направления вращения магнитного поля трехфазного тока следует поменять местами два любых провода из трех.

88. Неверно. В принципе можно, но тогда пришлось бы большой ток нагрузки генератора пропускать через скользящие контакты.

89. Правильно: $n_1 = 60 f / p$.

90. Неверно. В неподвижном роторе индуцируется максимальная ЭДС.

91. Вы ошибаетесь. Проанализируйте формулу $\operatorname{tg} \varphi_2 = x_2 / R_2 = s x_{2н} / R_2$.

92. Неправильно. Из электротехнической стали изготавливают сердечник ротора. Обмотку ротора выполняют из меди или алюминия.

93. Правильно. При рабочем режиме обмотки статора двигателя должны быть соединены треугольником. Тогда к каждой фазе обмотки приложено номинальное напряжение 127 В. Чтобы уменьшить пусковые токи, обмотки двигателя соединяют звездой.

94. Правильно. Чтобы ротор синхронного двигателя вошел в синхронизм, необходимо раскрутить его до скорости, близкой к скорости вращения поля. Этот процесс называют асинхронным пуском синхронного двигателя.

95. Правильно.

96. Правильно. Трехфазный двигатель, включенный в однофазную сеть, способен развивать без перегрева около $\frac{2}{3}$ своей номинальной мощности.

97. Неверно. Двигатель устойчиво работает и при моментах нагрузки, больших $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

98. Вы ошибаетесь. За счет изменения активного сопротивления цепи ротора осуществляется плавное регулирование скорости вращения двигателя.

99. Неверно. Трехфазная система позволяет получить вращающееся поле.

100. Неправильно. Этот способ применяют для увеличения пускового момента двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора.

101. Неверно. У двигателя с фазным ротором обычно предусматривается плавное регулирование скорости вращения.

102. Неверно. Три катушки позволяют получить двухполюсное вращающееся магнитное поле.

103. Вы неправильно определили скольжение относительно прямого поля.

104. Неправильно. Потери в стали асинхронного двигателя практически не зависят от нагрузки.

105. Неверно. Поскольку пусковой момент меньше момента нагрузки, ротор двигателя не запустится. При этом по его обмоткам протекает большой пусковой ток, двигатель перегревается и может выйти из строя.

106. Неправильно. Этот двигатель можно нагрузить значительно больше.

107. Правильно. Угловая скорость вращения результирующего магнитного поля равна угловой частоте токов, питающих катушки.

108. Вы ошиблись в вычислениях.

109. Неверно. В этом случае ток нагрузки генератора протекал бы через скользящий контакт между щетками и кольцами, что нецелесообразно.

110. Правильно. Сердечники статора и ротор находятся во вращающемся магнитном поле. Если их сделать сплошными, в них будут наводиться большие вихревые токи и возникнут большие тепловые потери.

111. Неверно. Если ротор с трехфазной обмоткой закрепить неподвижно и к концам обмотки подсоединить нагрузку, то получим аппарат, аналогичный трансформатору. Меняя положение ротора относительно статора, можно изменять фазу выходного напряжения.

112. Правильно.

113. Неверно. Характеристики сняты различными способами.

114. Правильно. Угловая скорость вращения результирующего магнитного поля равна угловой частоте тока, питающего катушки.

115. Неверно. Вспомните определение двухфазной и трехфазной системы.

116. Неправильно. Числом катушек статора определяется число пар полюсов вращающегося магнитного поля.

117. Неверно. При $s = 1$ вращающий момент равен пусковому.

118. Правильно. Питание электромагнита осуществляется постоянным током, который подводится к вращающемуся ротору от неподвижных зажимов через скользящие контакты в виде контактных колец и щеток.

119. Неверно. При $M_n > M_{\max}$ ротор остановится.

120. Неправильно. Асинхронный двигатель подсоединяют к сети с помощью неподвижных зажимов.

121. Правильно. При $s = 1$ вращающий момент двигателя равен пусковому. Таким образом, по условию задачи пусковой момент двигателя меньше момента нагрузки на валу. Двигатель нельзя запустить под нагрузкой. Если рассматриваемый двигатель запустить при отключенной нагрузке, а затем (например, с помощью фрикционной муфты) включить механическую нагрузку на валу, то двигатель будет работать, так как момент нагрузки по условию задачи меньше опрокидывающего момента.

122. Неверно. См. консультацию № 167.

123. Правильно. По условию задачи при неподвижном роторе $x_{2н} = 10R_2$. Для получения $x_{2н} = 10R_2'$ необходимо, чтобы $R_2' = 10R_2$ где R_2' – увеличенное сопротивление цепи обмотки ротора.

124. Правильно. Эта скорость равна скорости вращения поля n_1 .

125. Правильно. Ротор синхронного двигателя вращается со скоростью магнитного поля: $n_2 = n_1 = 60f/p = 60 \times 500/1 = 30\,000$ об/мин.

126. Вы ошибаетесь. Из формулы $s_{\text{опт}} = R_2 / x_{2н}$ следует, что при увеличении активного сопротивления ротора скольжение также увеличивается.

127. Неправильно. С такой скоростью ротор вращался бы, если поле имело четыре полюса ($p = 2$).

128. Неверно. Двухполюсное поле вращается быстрее четырехполюсного.

129. Неправильно. Ток в обмотке максимален, когда ротор неподвижен.

130. Правильно. По мере раскручивания ротора уменьшается скольжение s . При этом ток в обмотке ротора уменьшается.

131. Неверно. Скольжение уменьшится до нуля только в том случае, когда все тормозные моменты, включая моменты трения, уменьшатся до нуля.

132. Правильно. Чтобы соединить обмотку ротора с пусковыми или регулировочными реостатами, необходим скользящий контакт. Для получения такого контакта используются контактные кольца и щетки.

133. Правильно. В этом случае создается близкое к синусоидальному распределение магнитной индукции по длине воздушного зазора.

134. Неверно. Учтите, что ЭДС, индуцируемая в обмотке неподвижного ротора, прямо пропорциональна скорости вращения магнитного поля.

135. Правильно. Активное сопротивление обмотки ротора не зависит от скольжения; индуктивное сопротивление рассеяния $x_2 = s x_{2н} = 0,1 \cdot 10 = 1$ Ом.

136. Вы перепутали схемы соединения обмоток.

137. Правильно. При увеличении нагрузки увеличивает ток в обмотках двигателя и возрастают потери в меди. Потери в стали практически не меняются.

138. Неправильно. Следует поменять местами две фазы.

139. Вы ошибаетесь. Воспользуйтесь формулой $\eta = P_2 / P_1$.

140. Неверно. Изменяя число пар полюсов вращающегося магнитного поля, можно изменять скорость вращения ротора только в целое число раз.

141. Неверно. Магнитные силовые линии вне магнита направлены от северного магнитного полюса к южному.

142. Неправильно. При увеличении нагрузки скорость вращения ротора n_2 уменьшится, следовательно, скольжение $s = (n_1 - n_2) / n_1$ увеличится.

143. Неверно. На эти углы поле повернется за половину периода.

144. Вы перепутали характер изменения потерь в меди и стали.

145. Правильно: $s_{\text{опт}} = R_2 / x_{2н}$. При увеличении R_2 в 2 раза $s_{\text{опт}}$ также увеличивается в 2 раза.

146. Неверно. Шесть катушек позволяют получить четырехполюсное вращающееся магнитное поле.

147. Правильно. Скорость вращения магнитного поля статора увеличится в 2 раза и, как следует из уравнения трансформаторной ЭДС, в 2 раза увеличится индуцируемая в обмотке ротора ЭДС.

148. Неверно. С целью уменьшения пусковых токов необходимо при пуске соединить обмотку статора звездой.

149. Неправильно. Активное сопротивление обмотки ротора не зависит от скольжения.

150. Вы ошибаетесь. Скольжение $s_{\text{опт}}$ пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора.

151. Неверно. Учтите, что при изменении частоты тока изменится скорость вращения магнитного поля статора.

152. Правильно. Отношение индуктивных сопротивлений равно отношению частот или отношению скольжений: $x_{\text{обр}} / x_{\text{пр}} = s_2 / s_1 = 1,95 / 0,05 = 39$.

153. Правильно. Асинхронный двигатель с фазной обмоткой ротора изготавливается в тех случаях, когда необходимо регулировать его скорость и пусковой момент. Для этого в цепь обмотки ротора включают регулировочные или пусковые реостаты. Для соединения вращающейся обмотки с неподвижными реостатами предусмотрен скользящий контакт. Наличие колец и щеток служит отличительной особенностью асинхронного двигателя с фазным ротором.

154. Правильно.

155. Неверно. График зависимости $M(s)$ имеет максимум, а не минимум.

156. Неправильно. Учтите, что ротор синхронного двигателя вращается строго со скоростью магнитного поля.

157. Неверно. Ток в обмотке ротора зависит от скольжения, которое уменьшается по мере раскручивания ротора.

158. Правильно. При увеличении механической нагрузки на валу асинхронного двигателя скорость вращения ротора уменьшится. Это приведет к увеличению индуктированной ЭДС и тока в обмотке ротора.

159. Неверно. С такой скоростью ротор вращался бы при $p = 1$ (при числе полюсов вращающегося магнитного поля, равном двум).

160. Правильно. При $s = 1$ сумма $R_2^2 + x_{2н}^2 = 10 + 10 = 20$. Можно убедиться, что найденная сумма является наименьшей.

161. Неправильно. Если ротор раскрутится до скорости вращения магнитного поля, то его стержни не будут пересекаться магнитными силовыми линиями, исчезнут токи в обмотке ротора, а следовательно, и вращающий момент.

162. Неверно. Асинхронный двигатель рассчитывают таким образом, чтобы его вращающий момент при номинальной нагрузке соответствовал скольжению, меньшему, чем оптимальное.

163. Неправильно. Вспомните, что контактные кольца и щетки в синхронном двигателе используются для питания обмотки ротора.

164. Неверно. См. консультацию № 118.

165. Неверно. С такой скоростью ротор вращался бы при $p = 2$.

166. Неправильно. Учтите, что при прочих равных условиях, чем больше зазор, тем меньше магнитная индукция.

167. Правильно: $\operatorname{tg}\varphi_{2н} = x_{2н} / R_{2н} = 10/10 = 1$; $\varphi_{2н} = 45^\circ$.

168. Правильно. Сначала находим скорость вращения прямого и обратного магнитных полей $n = 60 f = 60 \cdot 50 = 3000$ об/мин. Затем определяем $s_1 = [(3000 - 2850)/3000] \times 100\% = 5\%$; $s_2 = [(3000 + 2850)/3000] \cdot 100\% = 195\%$.

169. Неправильно. Вы определили скорость вращения магнитного поля.

170. Неверно. Изменение направления вращения легко осуществимо.

171. Вы ошибаетесь. Пусковой момент двигателя соответствует $s = 1$.

172. Правильно. При соединении обмоток треугольником требуется в 3 раза большая пусковая емкость, чем при соединении обмоток звездой.

173. Неверно. Учтите, что обмотка ротора обладает не только активным, но и индуктивным сопротивлением.

174. Неправильно. Этот способ применим только в двигателях с фазной обмоткой ротора.

175. Правильно. При уменьшении нагрузки уменьшается активная составляющая тока, а реактивная составляющая (ток намагничивания) практически не меняется, так как магнитный поток асинхронного двигателя почти не зависит от нагрузки (сравните с трансформатором).

176. Вы ошиблись в вычислениях.

177. Правильно. Вращающий момент асинхронного двигателя возникает в результате взаимодействия токов обмотки ротора и вращающегося магнитного поля. Для увеличения токов обмотки ротора и одновременного уменьшения тепловых потерь обмотку изготавливают из материалов с высокой электрической проводимостью. Такими материалами являются алюминий и медь.

178. Неверно. Таким способом можно осуществить только ступенчатое регулирование скорости вращения двигателя.

179. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 17.

180. Неверно. Учтите, что при уменьшении нагрузки активная составляющая тока уменьшается, а реактивная практически не меняется.

181. Неправильно. При соединении обмоток звездой двигатель можно включить в сеть с более высоким напряжением, чем при соединении обмоток треугольником. Чем выше напряжение сети, тем меньше пусковая емкость.

182. Неверно. Коэффициент мощности двигателя зависит от нагрузки.

183. Неправильно. Этот способ можно применить для плавного регулирования скорости вращения двигателя. Однако устройства, позволяющие изменять частоту тока, сложны и широкого распространения не получили.

184. Неверно. Магнитное поле не может иметь нечетное число полюсов.

185. Неправильно. Воспользуйтесь формулой $s = (n_1 - n_2) \cdot 100\% / n_1$.

186. Неверно. Отношение индуктивных сопротивлений равно отношению частот.

187. Неправильно. Учтите, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора прямо пропорционально скольжению: $x_2 = s x_{2H}$.

188. Неверно. Если при рабочем режиме обмотки статора соединить звездой, то на каждую фазу будет приходиться $127 / \sqrt{3} \approx 73$ В. При этом двигатель не сможет развить номинального вращающего момента.

189. Воспользуйтесь формулой $\eta \approx (P_1 - P_{ст} - P_{мех} - P_M) / P_1$ ($P_{доб}$ – не учитывают).

190. Неверно. По правилу правой руки определяют направление ЭДС, индуцируемой в проводнике, движущемся перпендикулярно силовым линиям.

191. Неправильно. Проанализируйте график зависимости вращающего момента двигателя от скольжения.

192. Правильно. При холостом ходе ваттметр показывает потери в стали и механические потери; при коротком замыкании – потери в меди. Добавочные потери малы, их можно не учитывать.

193. Неверно. ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора при $s = 0,02$, не равна ЭДС, индуцируемой в обмотке при $s = 1$.

194. При $s = 2$ рассматриваемая сумма $(R_2^2 / s) + s x_{2H}^2 = (10/2) + 2 \times 10 = 25$. Найдите значение этой суммы при $s = 1,5$.

195. Неверно. Если в паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 127/220 В, то это означает, что каждая фаза обмотки рассчитана на напряжение 127 В. Включив обмотки статора треугольником, вы подадите на каждую фазу 220 В. При этом обмотка будет перегреваться и может выйти из строя.

196. Неверно. При $t = T/4$ ток i_B положителен.

197. Неправильно. Отметьте на графике моменты времени $t = T/4$ и $t = T/2$ и запишите значения токов i_A и i_B для них.

198. Неверно. Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя очень высок, порядка 90–95 %.

199. Неверно. Обратите внимание на то, что кривая зависимости вращающего момента двигателя от скольжения имеет максимум.

200. Вы ошибаетесь.

201. Правильно: $E_{2н} = E_2 / s = 1/0,02 = 50$ В.

202. Неправильно. В этом случае распределение магнитной индукции по длине воздушного зазора равномерно, а для получения синусоидальной ЭДС необходимо синусоидальное распределение магнитной индукции.

203. Неверно. Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от напряжения питания.

204. Неправильно. В пределах устойчивых режимов работы асинхронный двигатель обладает достаточно жесткой механической характеристикой.

205. Неверно. Глубоко врезанные в сердечник ротора узкие пазы, в которых размещаются плоские стержни обмотки, обеспечивают увеличение пускового момента двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора.

206. Неправильно. Одного этого условия недостаточно.

207. Неверно. Вы забыли о законе сохранения энергии; генератор должен вырабатывать мощность большую, чем потребляет двигатель.

208. Вы ошибаетесь. Вращающий момент двигателя не зависит от активного сопротивления обмотки ротора.

209. Неправильно. Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения на его зажимах.

210. Неверно. Внимательно посмотрите график токов, найдите на абсциссе точки $t = T/4$ и $t = T/2$. Подумайте, чему равны токи в эти моменты времени.

211. Неправильно. Можно ограничиться меньшей расчетной мощностью.

212. Неверно. Это необходимое, но недостаточное условие.

213. Вы ошиблись в вычислениях.

214. Вы ошибаетесь: $n_1 = 60f / p = 60 \cdot 500 / 2 = 15\,000$ об/мин.

215. Неверно. По правилу левой руки определяют направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.

216. Вы ошиблись в вычислениях. См. консультацию № 68.

217. Неправильно. Учтите, что индуктивное сопротивление обмотки прямо пропорционально частоте тока, определяемой скольжением.

218. Неверно. Учтите, что образуется вращающееся магнитное поле, у которого число пар полюсов $p = 2$.

219. Неправильно. Прямое и обратное поля вращаются в противоположные стороны, поэтому ротор не может иметь относительно этих полей одно и то же скольжение.

220. Правильно. Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения на его зажимах.

221. Неверно. Необходимо выполнение трех условий:
 $I_B = \text{const}$; $\omega = \text{const}$; $\cos \varphi = \text{const}$.

222. Можно получить вращающееся магнитное поле с любым числом пар полюсов p .

223. Правильно. Генератор должен передать в двигатель полную мощность $S = P / \cos \varphi = 5 / 0,5 = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

224. Правильно. В режиме холостого хода (при отсутствии механической нагрузки на валу) ротор асинхронного двигателя вращается с максимальной скоростью. При этом скорость пересечения силовыми линиями магнитного поля стержней обмотки ротора двигателя минимальна.

225. Правильно.

226. Вы ошибаетесь. Сначала определите скорость вращения поля по формуле $n_1 = 60f / p$, а затем найдите скольжение из выражения, представленного в консультации № 68.

227. Неверно. Вспомните, что при холостом ходе $P_2 = 0$.

К главе 10

1. Неверно. Изоляция витков в масляных трансформаторах действительно надежнее, чем в сухих. Допустимая плотность тока определяется условиями охлаждения обмотки.

2. Неправильно. См. консультацию № 18.

3. Правильно:

$$I_c = P/U_1 = 100/100 = 1 \text{ А}; \quad I_M = \sqrt{I_0^2 - I_c^2} = \sqrt{5^2 - 1^2} = 4,9 \text{ А}.$$

4. Правильно. При увеличении тока во вторичной обмотке увеличивается ток в первичной обмотке, а магнитный поток в сердечнике, равный разности магнитных потоков, создаваемых катушками, остается неизменным.

5. Неверно. Вспомните уравнение второго закона Кирхгофа для цепи первичной обмотки трансформатора.

6. Неправильно. Учтите, что линейные напряжения зависят от способа соединения обмоток трансформатора.

7. Правильно.

8. Правильно. При холостом ходе трансформатора $I_1 = I_0$, а $I_2 = 0$, поэтому отношение теряет смысл (обращается в бесконечность).

9. Правильно.

10. Правильно: $\Delta U = (U_{2н} - U_2)/U_{2н} = (400 - 380)/400 = 5\%$.

11. Правильно: $k = \omega_1/\omega_2 = 200/1000 = 0,2$; $c = \sqrt{3}k = 0,2\sqrt{3}$; $U_{л2} = cU_{л1} = 0,2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1000 = 200\sqrt{3} \text{ В}$.

12. Правильно. При отсутствии потерь в сердечнике $I_c = 0$; $I_0 = I_M$.

13. При холостом ходе потери энергии в обмотках близки к нулю, а потери энергии в сердечнике равны номинальным потерям.

14. Правильно. Сварочный трансформатор часто работает в режиме короткого замыкания. Кроме того, при крутопадающей внешней характеристике обеспечивается почти постоянная сила тока при колебаниях руки сварщика.

15. Неверно. Учтите, что при наличии нагрузки напряжение U_2 отличается от ЭДС E_2 на величину падения напряжения внутри вторичной обмотки.

16. Вы ошибаетесь. Как очевидно из графика, максимум КПД достигается при токе в нагрузке $I_2 = 20$ А. Именно при этом токе $P_m = P_c$. Обычно этот ток составляет половину номинального тока.

17. Неверно. При холостом ходе мощность потерь в меди обмоток составляет тысячные доли мощности этих потерь при номинальном режиме.

18. Неправильно. ЭДС сдвинуты по фазе друг относительно друга на 120° . Для индуктирования этих ЭДС необходимы три различных магнитных потока, следовательно, сердечник должен иметь три стержня.

19. Правильно. Внешняя характеристика выражает зависимость U_2 от I_2 при $U_1 = \text{const}$; $\omega = \text{const}$; $\varphi_2 = \text{const}$.

20. Неверно. Вы определили ток холостого хода, в который намагничивающий ток входит как одна из двух составляющих: $I_0 = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}$.

21. Неверно. Результирующая намагничивающая сила так же, как и результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора, не зависит от тока нагрузки.

22. Вы забыли постоянную интегрирования.

23. Неверно. Индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки x_{s1} практически не изменяется в процессе работы трансформатора.

24. Неверно. Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки x_{s1} практически не изменяется в процессе работы трансформатора.

25. Правильно. Сердечник бронзового трансформатора защищает обмотку от механических повреждений.

26. Неверно. Электроэнергия постоянного тока с помощью сравнительно простых устройств столь же легко преобразуется в тепловую и механическую энергию, как и электроэнергия переменного тока.

27. Неверно. Вы перепутали режимы работы, на которые рассчитаны измерительные трансформаторы.

28. Неверно. Такое различие между магнитным потоком рассеяния и основным магнитным потоком существует, но оно не принципиально. В некоторых трансформаторах (например, в сварочных) для увеличения потоков рассеяния их замыкают через стальной магнитопровод.

29. Неправильно. Реле с малым входным сопротивлением можно подключить к трансформатору тока.

30. Вы ошибаетесь. Максимальное значение $\cos \omega t$ равно единице. Следовательно, максимальное значение магнитного потока $\Phi_m = 0,01$ Вб.

31. Неверно. Учтите, что: 1) при опыте холостого хода $I_2 = 0$; $I_0 \approx 0,05 I_{\text{ном}}$; 2) потери в активном сопротивлении пропорциональны квадрату силы тока.

32. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 59.

33. Правильно. Постоянная интегрирования A определяется на основании физических условий, существующих в схеме, для которой составлено интегральное уравнение.

34. Правильно. Это принципиальное отличие, которое определяет как конструктивные, так и эксплуатационные особенности автотрансформатора.

35. Неправильно. Вспомните уравнение трансформаторной ЭДС и установите, от каких физических величин зависит магнитный поток в сердечнике трансформатора.

36. Вы ошибаетесь. Правильное решение: $\eta = P_2 / (P_2 + P_m + P_{\text{ст}}) = 970 / (970 + 20 + 10) = 0,97$.

37. Вы ошибаетесь. Прочитайте консультацию № 183.

38. Неверно. Поскольку магнитный поток в сердечнике существует, намагничивающая сила, его создающая, не может быть равна нулю.

39. Неверно. Это уравнение определяет мгновенное значение ЭДС как функцию времени.

40. Вы ошибаетесь. Поскольку $\omega_1 < \omega_2$, трансформатор понижает, а не повышает напряжение, следовательно, напряжение на выходе не может быть больше напряжения на входе.

41. Правильно. Магнитный поток в сердечнике и результирующая намагничивающая сила практически не зависят от режима работы трансформатора.

42. Вы ошибаетесь. Посмотрите консультацию № 59.

43. Правильно.

44. Неверно. При индуктивном характере нагрузки кривая $U_2(I_2)$ не может располагаться выше кривой 1.

45. Неверно. Вы определили ток, вызываемый потерями в сердечнике на гистерезис, и вихревые токи.

46. Неправильно. Поскольку трансформатор понижающий, к питающей сети подсоединяют зажимы высшего напряжения, обозначаемые большими буквами.

47. Правильно. Перемешивание масла существенно улучшает отвод тепла, выделяющегося в обмотках.

48. Неверно. Напряжение на зажимах вторичной обмотки сварочного трансформатора меняется от 60–70 В до значений, близких к нулю.

49. Наоборот, потери энергии в обмотках зависят, в сердечнике не зависят от тока нагрузки.

50. Вы неправильно учли знак интеграла.

51. Неверно. Учтите следующую цепочку зависимостей: 1) потери в стали сердечника при постоянстве частоты питающей сети полностью определяются магнитным потоком; 2) магнитный поток в сердечнике и напряжение на первичной обмотке (напряжение питающей сети) связаны уравнением трансформаторной ЭДС, $U_1 \approx 4,44\omega_1 f \Phi_m$; 3) по условию опыта холостого хода на первичной обмотке устанавливается номинальное напряжение $U_1 = U_{\text{ном}}$.

52. Вы ошибаетесь. Учтите, что коэффициент трансформации $k \approx U_2 / U_1 \approx I_1 / I_2$.

53. Правильно. Если напряжение на выходе трансформатора U_2 больше, чем напряжение на входе U_1 , трансформатор называют повышающим. При этом в соответствии с законом сохранения энергии ток во вторичной цепи меньше тока в первичной цепи.

54. Правильно. Основным признаком магнитного потока рассеяния является то, что он не проходит через вторую обмотку (рассеивается).

55. Вы ошибаетесь. Трансформаторы находят широкое применение не только в этих, но и во многих других областях техники.

56. Неверно. Технология изготовления сплошного сердечника при равных условиях не сложнее технологии изготовления порошкового сердечника.

57. Неправильно. Еще раз внимательно рассмотрите векторные диаграммы для вторичной цепи трансформатора и подумайте, как зависит напряжение на зажимах вторичной обмотки от характера нагрузки.

58. Правильно. Разъяснения даны в консультациях № 100 и 140.

59. Вы ошибаетесь. Правильное решение: $k = U_2 / U_1 = 500 / 100 = 5$; $\omega_2 = k\omega_1 = 5 \cdot 200 = 1000$.

60. Неверно. Так изменяется индуктивное сопротивление рассеяния обмоток в сварочном трансформаторе типа ТС-500.

61. Неверно. См. консультацию № 62.
62. Вы ошибаетесь. Правильное решение: $\eta = P_2/P_1 = 9,8/10 = 0,98$.
63. Правильно. В первом случае уменьшаются потери в линии электропередачи, во втором – упрощается изоляция потребителей электроэнергетики, снижается опасность поражения электрическим током людей и животных.
64. Вы ошибаетесь. В линиях электропередачи применяют силовые трансформаторы, но это далеко не единственная область их применения.
65. Неправильно. Учтите, что потери энергии при номинальной нагрузке равны суммарным потерям энергии, измеренным в опытах холостого хода и короткого замыкания.
66. Неверно. Потери энергии в трансформаторе при номинальной нагрузке равны сумме потерь, измеренных в опытах холостого хода и короткого замыкания.
67. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 36.
68. Неверно. Воспользуйтесь формулами $I_1 = P/U_1$; $k \approx I_1/I_2$.
69. Неправильно. Потребление электроэнергии при высоких напряжениях опасно для персонала, обслуживающего электрические установки.
70. Неверно. Напряжение на зажимах вторичной обмотки U_2 не может превышать ЭДС E_2 , так как меньше ее на величину внутреннего падения напряжения. Напряжение U_2 может превышать ЭДС E_1 примерно в k раз (в повышающем трансформаторе).
71. Вы ошиблись в вычислениях.
72. Правильно. При подключении этих приборов трансформатор напряжения практически будет замкнут накоротко. Это приведет к существенному увеличению погрешностей измерения и к перегреву трансформатора.
73. Вы ошибаетесь. Помните, что магнитный поток в сердечнике практически не зависит от нагрузки трансформатора.
74. Неправильно. Помните определение внешней характеристики трансформатора.
75. Неверно. При равных условиях магнитная проводимость порошкового сердечника меньше, чем сплошного.
76. Вы ошибаетесь. Напряжение U_2 зависит от сопротивления нагрузки, но эта зависимость имеет другой вид, чем та, которая представлена на рисунке.
77. Правильно. Чтобы выяснить характер зависимости U_2 от I_2 , необходимо параметры, которые могут изменять-

ся в процессе работы трансформатора, поддерживать на заданном уровне: $U_1 = \text{const}$; $\omega = \text{const}$; $\Phi_2 = \text{const}$.

78. Неверно. Ток холостого хода определяется магнитным потоком и потерями в сердечнике трансформатора. Коэффициент трансформации не влияет на силу тока холостого хода.

79. Правильно: амплитуда Φ_m равна коэффициенту при $\cos \omega t$.

80. Неправильно. Учтите, что $k = \omega_2 / \omega_1 \neq 1$.

81. Правильно: $\eta = P_2 / P_1 = 9,8 / 10 = 0,98$.

82. Неверно. Напряжение U_2 зависит от характера нагрузки ($\cos \varphi_2$), но эта зависимость не является внешней характеристикой трансформатора.

83. Правильно. Необходимо знать, как соединены первичные и вторичные обмотки трансформатора.

84. Неверно. Учтите, что при таком соединении обмоток $c = \sqrt{3}k = \sqrt{3}(\omega_2 / \omega_1)$.

85. Неверно. Вспомните, что потери в активном сопротивлении линии электропередачи пропорциональны квадрату силы тока, а надежная изоляция высоковольтных потребителей электроэнергии чрезвычайно сложна.

86. Вы ошибаетесь. Такое различие между магнитным потоком рассеяния и основным магнитным потоком существует, но оно не принципиально. В некоторых трансформаторах (например, в сварочных) магнитные потоки рассеяния искусственно увеличивают во много раз.

87. Правильно. ЭДС первичной и вторичной обмоток отстают по фазе от магнитного потока на один и тот же угол 90° .

88. Неправильно. Если вторичную обмотку трансформатора сделать со скользящим контактом, то его коэффициент трансформации k можно менять так же, как у автотрансформатора.

89. Неверно. Вы забыли ваттметр, необходимый для измерения потерь в сердечнике трансформатора.

90. Правильно. Результирующая намагничивающая сила равна намагничивающей силе первичной обмотки трансформатора при холостом ходе: $F = \omega_1 I_0 = 100 \cdot 1 = 100 \text{ А}$.

91. Неверно. Режимы работы измерительных трансформаторов определяются заранее при расчете и в процессе эксплуатации этих аппаратов не могут быть изменены.

92. Правильно. Показания ваттметра определяются только мощностью потерь в стали сердечника.

93. Правильно. Повышенное напряжение (например, 220 или 380 В) становится особенно опасным, когда вероятен контакт человека с металлическими конструкциями.

94. Правильно. Потери энергии в меди обмоток пропорциональны квадрату силы тока, потери в стали сердечника квадрату магнитного потока; при изменении тока нагрузки магнитный поток не меняется.

95. Неверно. Это зажимы низшего напряжения, к которым подсоединяют нагрузку трехфазного трансформатора.

96. Неправильно. Почему вы исключаете возможность индуктивного характера нагрузки?

97. Неверно. Амперметр можно подключить к трансформатору тока.

98. Вы ошибаетесь. Учтите, что при равенстве потерь энергии в обмотках и сердечнике КПД трансформатора имел бы максимальное значение.

99. Неверно. Тип трансформатора определяется соотношением напряжений, а не токов первичной и вторичной цепи.

100. Неверно. Воспользуйтесь формулой $E = 2\pi f \omega \Phi_m / \sqrt{2}$.

101. Неверно. См. консультации № 31, 51.

102. Вы ошибаетесь. Специальные трансформаторы используются для питания специфических потребителей, например сварочных аппаратов.

103. Неверно. На рис. изображены два различных по типу трансформатора: а) стержневой; б) броневой.

104. Правильно. См. консультацию № 36.

105. Неверно. Воспользуйтесь формулами $k = \omega_2 / \omega_1$; $c = k / \sqrt{3}$.

106. Неверно. При холостом ходе трансформатора напряжение на его первичной обмотке равно номинальному напряжению, а следовательно, и магнитный поток равен номинальному значению: $U_1 \approx 4,44 \omega_1 f \Phi_m$.

107. Неверно. Вспомните, что в формулу индуктивного сопротивления $x_\sigma = \omega L_\sigma$ входит угловая частота тока ω , которая в 2π раз больше его частоты f .

108. Неверно. При холостом ходе трансформатора потери энергии в меди обмоток пренебрежимо малы, поэтому мощность, измеренная ваттметром, отличается от мощности полных потерь энергии, возникающих в трансформаторе при номинальном режиме его работы.

109. Неверно. При наличии потерь в сердечнике трансформатора ток холостого хода сдвинут по фазе относительно магнитного потока на небольшой угол.

110. Правильно. Только в случае повышения U_2 при увеличении нагрузки можно определенно сказать, что нагрузка имеет емкостный характер.

111. Правильно. В мелких зернах металла не могут индуцироваться большие ЭДС и вихревые токи, несмотря на высокую частоту и большую скорость изменения магнитного потока.

112. Вы ошибаетесь. Прочтите консультацию № 68.

113. Неверно. Для автотрансформаторов характерен малый коэффициент трансформации, но с малым коэффициентом k могут изготавливаться и трансформаторы.

114. Неверно. Поскольку в первичной обмотке при холостом ходе протекает некоторый ток, векторы \vec{E}_1 и \vec{U}_1 не равны и повернуты на некоторый угол один относительно другого.

115. Правильно. Кривая $U_2(I_2)$ при индуктивном характере нагрузки располагается ниже, а при емкостном характере – выше кривой 1.

116. Правильно:

$$\omega_2 = \omega_1 / k = 0,1\omega_1; \quad I_2 = I_1 / k = 0,1I_1; \quad I_1 - I_2 = I_1 - 0,1I_1 = 0,9I_1.$$

117. Неверно. См. консультацию № 10.

118. Неверно. Из формулы для трансформаторной ЭДС $U_1 \approx 4,44\omega_1 f \Phi_m$ очевидно, что магнитный поток в сердечнике Φ_m практически не зависит от тока нагрузки.

119. Правильно. Подключение вольтметра, обладающего большим входным сопротивлением, практически равнозначно обрыву вторичной цепи. При этом трансформатор тока будет перегреваться, а на его зажимах возникает большое выходное напряжение, опасное для оператора.

120. Неверно. Учтите, что объем масла, заливаемого в бак, меняется при изменении температуры.

121. Неверно. Посмотрите, как связаны между собой углы φ_1 и φ_2 на векторной диаграмме нагруженного трансформатора.

122. Вы ошибаетесь. Почему вы исключили возможность чисто активной нагрузки?

123. При опыте холостого хода ток во вторичной обмотке $I_2 = 0$, следовательно, нет необходимости во втором амперметре.

124. Неверно. Эти три значения E_1 , E_2 и U_2 совпадают по фазе при холостом ходе трансформатора.

125. Правильно. Потери в сердечнике определяются магнитным потоком, который связан с напряжением первичной обмотки формулой для трансформаторной ЭДС $U_1 \approx 4,44\omega_1 f \Phi_m$. Если U_1 имеет номинальное значение, то и Φ_m и потери в сердечнике номинальны. Потери в меди обмоток пренебрежимо малы, так как $I_2 = 0$, а $I_0 \approx 0,05 I_{\text{ном}}$.

126. Правильно. При $I_2 = 20$ А КПД максимален, а максимальный КПД достигается при равенстве потерь энергии в меди обмоток, и в стали сердечника.

127. Вспомните, что тепловые потери электроэнергии в обмотках пропорциональны квадрату силы тока, протекающего через нее.

128. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 18.

129. Неверно. При отсутствии потерь в сердечнике ток холостого хода равен намагничивающему току, который всегда совпадает по фазе с магнитным потоком.

130. Неверно. Электроэнергию на дальние расстояния можно передавать и по линиям постоянного тока высокого напряжения. Расчеты показывают, что такие линии могут быть экономически более выгодными, чем линии переменного тока.

131. Неправильно. См. консультацию № 17.

132. Неверно. Отношение напряжений на выходе и входе трансформатора при всех режимах работы приблизительно равно коэффициенту трансформации. При холостом ходе трансформатора точность равенства увеличивается.

133. Вы ошибаетесь. Так изменяется индуктивное сопротивление рассеяния вторичной цепи сварочного трансформатора типа СТЭ.

134. Неверно. Уравнение трансформаторной ЭДС связывает действующее (а не мгновенное) значение ЭДС в обмотке с магнитным потоком в сердечнике. В задании же требуется найти связь между магнитным потоком и мгновенным значением ЭДС в обмотке.

135. Это приближенное равенство справедливо при всех режимах работы трансформатора. В режиме холостого хода точность его увеличивается, так как ток холостого хода невелик и падение напряжения на сопротивлении первичной обмотки мало.

136. Правильно: $k = E_2 / E_1$, но $k \approx U_2 / U_1$, так как всегда $U_1 > E_1$ и $E_2 > U_2$ только при холостом ходе $U_2 = E_2$.

137. Вы ошиблись в вычислениях. См. консультацию № 10.

138. Неверно. Вспомните, что результирующая намагничивающая сила равна намагничивающей силы первичной обмотки при холостом ходе трансформатора.

139. Правильно. Крутопадающая внешняя характеристика получается за счет увеличения магнитных потоков рассеяния.

140. Вы ошибаетесь. Правильное решение:

$$E = 2\pi f \omega \Phi_m / \sqrt{2} = 2\pi \cdot 100 \cdot 100 \sqrt{2} \cdot 0,01 / (\sqrt{2} \cdot 2\pi) = 100 \text{ В.}$$

141. Правильно. Всегда $U_2 < E_2$ и только при холостом ходе $U_2 = E_2$. Но $U_2 \approx kU_1$ может быть значительно больше $E_1 \approx U_1$, если $k > 1$.

142. Правильно. Силовые трансформаторы рассчитываются на средние и большие мощности, относительно большие токи нагрузки и промышленную частоту 50 Гц.

143. Вы ошибаетесь. Прочтите консультацию № 174.

144. Неверно. См. консультацию № 147.

145. Вы ошибаетесь. См. консультации № 70, 141, 185.

146. Такое утверждение было бы справедливым, если бы напряжение U_2 увеличивалось с ростом тока нагрузки.

147. Правильно. Непосредственно в трансформаторе проявляется явление взаимной индукции. В основе явления взаимной индукции лежит закон, связывающий индуцируемую ЭДС с изменяющимся магнитным потоком.

$$148. \text{Правильно: } k = \omega_2 / \omega_1 = 200 / 1000 = 0,2; c = k / \sqrt{3} = 0,2 / \sqrt{3}; U_{\text{н2}} = cU_{\text{н1}} = (0,2 / \sqrt{3})1000 = 200 / \sqrt{3} \text{ В.}$$

149. Неверно. Равенства, выражающие отношение ЭДС через отношение чисел витков, точные, а не приближенные.

150. Правильно. Помимо однофазных трансформаторов наша промышленность выпускает сварочные трансформаторы с выпрямителями для трехфазных цепей.

151. Неверно. Отношению чисел витков обмоток равно отношению ЭДС. Так как напряжения U_1 и U_2 несколько отличаются от соответствующих ЭДС, их отношение равно отношению чисел витков только приближенно.

152. Неправильно. Именно на подключение этих приборов рассчитан трансформатор напряжения.

153. Правильно: $E_2 / E_1 = e_2 / e_1 = \omega_2 / \omega_1 = k$.

154. Неверно. Закон Ампера определяет силу, действующую на проводник с током в магнитном поле, и к принципу действия трансформатора отношения не имеет.

155. Неверно.

156. Вы ошибаетесь. Токовая обмотка ваттметра может быть подключена к трансформатору тока.

157. Правильно. При высоком напряжении пришлось бы ставить большие гасящие сопротивления, чтобы получить заданную силу сварочного тока.

158. Неверно. Внимательно рассмотрите векторную диаграмму нагруженного трансформатора. Подумайте, как связаны между собой углы ϕ_1 и ϕ_2 .

159. Вы ошибаетесь. Измерительные трансформаторы предназначены для питания маломощных измерительных приборов и устройств автоматики.

160. Неправильно. Линии электропередачи постоянного тока строятся на такие же и еще более высокие напряжения, чем линии переменного тока; потребители электроэнергии во всех случаях рассчитываются на относительно невысокие напряжения.

161. Неверно. Учтите, что при таком числе витков обмоток $k \neq 1$.

162. Неверно. Воспользуйтесь формулой $\eta = P_2 / P_1$.

163. Правильно. Если учесть, что $E_m \sin \omega t = e$, получим $d\Phi = -(1/\omega) e dt$, откуда очевидно, что магнитный поток в сердечнике и мгновенное значение ЭДС связаны дифференциальной зависимостью.

164. Вы правы, в технике связи широко применяют самые разнообразные трансформаторы, но это далеко не единственная область их применения.

165. Неверно. Это равенство при холостом ходе трансформатора справедливо, так как ток нагрузки равен нулю и падение напряжения внутри вторичной обмотки отсутствует.

166. Правильно. При отличии режима работы измерительных трансформаторов от расчетного погрешности измерений увеличатся и трансформаторы будут перегреваться.

167. Неполный ответ.

168. Правильно. Повышать напряжение и соответственно уменьшать ток необходимо для снижения потерь в линиях электропередачи заданной мощности.

169. Неправильно. Конструктивно проще было бы увеличить активное, а не индуктивное сопротивление обмоток.

170. Неверно. Внимательно рассмотрите векторную диаграмму трансформатора при холостом ходе. Вектор магнитного потока расположен под углом 90° к векторам \vec{E}_1 и \vec{E}_2 . Подумайте, что это значит.

171. Вы перепутали типы трансформаторов.

172. Правильно.

173. Правильно. ЭДС E_1 и E_2 всегда совпадают по фазе. При холостом ходе ЭДС E_2 совпадает по фазе с U_2 , следовательно, все три вектора параллельны.

174. Правильно. Через обмотку катушки будет протекать ток намагничивания, создающий магнитный поток в сердечнике.

175. Правильно. Клеммы высшего напряжения обозначаются большими буквами.

176. Неверно. Амплитуда косинусоидальной функции времени равна коэффициенту при $\cos \omega t$. Следовательно, $\Phi_m = 0,01$ Вб.

177. Правильно. Расширитель должен иметь свободный объем для поглощения масла, расширяющегося при повышении температуры.

178. Неверно. Обмотка 2 является обмоткой высшего напряжения с большим числом витков из тонкого провода. Она имеет худшие условия охлаждения и поэтому располагается снаружи.

179. Правильно. При перемещениях магнитного шунта изменяются потоки рассеяния.

180. Правильно. Увеличение индуктивного сопротивления не приводит к увеличению тепловых потерь.

181. Неверно. Учтите, что при таком соединении обмоток $c = k / \sqrt{3} = \omega_2 / (\sqrt{3}\omega_1)$.

182. Правильно. Из векторной диаграммы нагруженного трансформатора очевидно, что $\Phi_2 \approx \Phi_1$ (при условии, что $I_0 \ll I_1$).

183. Правильно: $x_s = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,001 = 0,314$ Ом.

184. Правильно. Сумма потерь энергии в сердечнике и обмотках равна потерям энергии в трансформаторе при номинальной нагрузке.

185. Напряжение U_2 может превышать ЭДС E_1 примерно в k раз (в повышающем трансформаторе), но не может превышать ЭДС E_2 , так как меньше ее на величину внутреннего падения напряжения.

186. Неверно. Магнитный поток в сердечнике и создающая его намагничивающая с практически не зависят от тока нагрузки и при всех режимах работы трансформатора равны расчетным значениям.

187. Неполный ответ.

К главе 11

1. Правильно. Внешние условия влияют на точность измерения, но не характеризуют ее.

2. Неверно. В отдельных случаях ориентировка прибора относительно магнитного поля земли может заметным образом сказаться на его показаниях.

3. Неправильно. Алюминиевый каркас рамки, находящийся в магнитном поле постоянного магнита, выполняет роль демпфера.

4. Неверно. Вы забыли неподвижную катушку, без которой создание вращающего момента невозможно.

5. Правильно. Преобразование показаний в цифровой код требует введения в конструкцию прибора дополнительных элементов.

6. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 66.

7. Правильно.

8. Неверно. При равенстве потенциалов точек, к которым подсоединен гальванометр, это условие может и не выполняться.

9. Неправильно. См. консультацию № 203.

10. Неверно. При сжатии стержня изменятся геометрические размеры тензометрического датчика, а следовательно, и его сопротивление.

11. Неполный ответ.

12. Правильно. Наибольшая приведенная погрешность прибора равна его классу точности, выраженному в процентах. Ошибка может иметь как положительный, так и отрицательный знак.

13. Правильно. Магнитные силовые линии замыкаются по экрану и не попадают внутрь прибора.

14. Неверно. Противодействующий момент пропорционален углу отклонения подвижной системы.

15. Правильно. Быстро меняющаяся величина даже за небольшое время может существенно отклониться от выраженного в числовой форме измеренного значения.

16. Вы ошибаетесь:

$$\delta_1 = R_A 100\% / R_H = 0,1 \cdot 100\% / 10 = 1\%; \quad \delta_2 = R_H 100\% / R_V = 10 \cdot 100\% / 1000 = 1\%.$$

17. Неверно. При измерении мощности одним ваттметром его включают на фазные ток и напряжение.

18. Неверно. Больших по сравнению с каким сопротивлением?

19. Неправильно. Приборы непосредственной оценки тоже градуируются в единицах измеряемой величины.

20. Правильно. При увеличении амплитуды пилообразного напряжения горизонтальные перемещения светящейся точки на экране увеличатся. При этом увеличится ширина изображения.

21. Неполный ответ.

22. Неверно. Приведенную погрешность принято выражать в процентах.

23. Вы ошибаетесь. Зазор необходим.

24. Правильно. Прибор электромагнитной системы имеет квадратичную шкалу, так как угол отклонения подвижной системы пропорционален квадрату силы тока.

25. Неверно. Если быстро меняющуюся величину измерять через значительные промежутки времени, то ее мгновенное значение может отклониться от фиксированного.

26. Правильно. Неподвижную обмотку ваттметра наматывают из толстого провода и включают последовательно с потребителем, подвижную обмотку наматывают из провода малого сечения и включают параллельно потребителю.

27. Правильно. В схемах с нулевым проводом ваттметры включаются в каждую фазу, а в схемах без нулевого провода – в линию.

28. Вы ошибаетесь. Посмотрите консультацию № 128.

29. Неверно. Количество потребляемой мостом энергии очень мало зависит от тока в измерительной диагонали.

30. Неправильно. В данном случае яркость изображения незначительно уменьшится, так как одно и то же количество электронов, падающих на экран в единицу времени, будет распределено по большей поверхности.

31. Вы ошибаетесь. Точность измерений во многих случаях зависит от условий эксперимента, но характеризуется она строго определенной величиной.

32. Правильно. Цифра выражает напряжение в киловольтах, при котором испытана изоляция прибора.

33. Неверно. Вращающий момент пропорционален току, протекающему по рамке.

34. Правильно. Вращающий момент создается в результате взаимодействия проводников, по которым протекает ток.

35. Неверно. Цифровой прибор легко сопрягается с ЦВМ.

36. Неправильно. Учтите, что часть напряжения падает на собственном сопротивлении вольтметра.

37. Правильно. Индуктивное сопротивление обмотки напряжения значительно больше ее активного сопротивления, а индуктивное сопротивление токовой обмотки – того же порядка, что и ее активное сопротивление.

38. Неверно. Градуировка прибора не может осуществляться при закороченных зажимах.

39. Правильно. На экране осциллографа можно наблюдать только периодический процесс. Для наблюдения непериодического процесса экран должен обладать послесвечением.

40. Правильно. В этом случае не будет однозначной зависимости между сигналом на выходе датчика и измеряемой неэлектрической величиной.

41. Неправильно. Сантиметр, грамм, вольт не являются основными единицами измерения в СИ.

42. Неверно. Такой знак может быть нанесен и на шкалу прибора, предназначенного для измерений в цепях постоянного тока.

43. Неверно. Можно, так как напряжение и ток связаны однозначной зависимостью.

44. Правильно. Если зазор между поршнем и цилиндром в воздушном демпфере будет отсутствовать, то поршень и связанная с ним стрелка потеряют подвижность и работа прибора станет невозможной. Если зазор сделать большим, перепад давлений по обеим сторонам поршня будет малым и демпфирующий момент недостаточным.

45. Правильно. Представление чисел и правила арифметических действий наиболее просты в двоичной системе.

46. Правильно. При параллельном соединении шунта и амперметра через амперметр протекает ток 10 А, через шунт – ток в 5 раз больший (50 А). Общий максимально допустимый ток составляет 60 А.

47. Неверно. Линейные напряжения измеряются непосредственно между проводами линии или между зажимами на щитке питания.

48. Правильно. Эту схему целесообразно применять для измерения малых сопротивлений, когда током вольтметра можно пренебречь по сравнению с током, протекающим через искомое сопротивление.

49. Неверно. При одном и том же угле поворота зеркала перемещение светового пятна на экране тем больше, чем длиннее световой луч.

50. Неправильно. Устройство для измерения электрической или неэлектрической величины называют измерительным элементом.

51. Неверно. Вольт не является основной единицей измерения в СИ.

52. Правильно. Показанный знак является стилизованным изображением обмотки электромагнита и сердечника из ферромагнитного материала.

53. Правильно. Магнитоэлектрический прибор можно отградуировать как амперметр, вольтметр и омметр.

54. Неверно. Если зазор будет большим, то перепад давления по обеим сторонам поршня будет отсутствовать.

55. Неправильно. Представление результатов оператору производят в десятичной системе счисления.

56. Вы ошибаетесь. Посмотрите консультацию № 96.

57. Правильно. Только в этом случае суммарная мощность трехфазной цепи равна сумме показаний трех ваттметров.

58. Неверно. При включении по этой схеме сопротивление амперметра не влияет на результат измерения.

59. Неправильно. Еще раз посмотрите оптическую схему осциллографа.

60. Вы ошибаетесь. Датчиком называют устройство, преобразующее изменения неэлектрической величины в изменения электрической величины.

61. Неверно. Качество измерительного прибора косвенным образом влияет на точность измерений, но не является ее характеристикой.

62. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 2.

63. Неправильно. Противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружины (углу поворота подвижной системы прибора).

64. Неверно. Это принцип работы прибора магнитоэлектрической системы.

65. Неверно. Показания цифрового прибора без искажений могут быть переданы на значительные расстояния.

66. Правильно: $R_d = R_V(n-1) = 5000 [(500/100) - 1] = 20 \text{ кОм}$.

67. Неверно. Тормозной момент пропорционален скорости вращения диска.

68. Правильно. Вследствие изменения напряжения батареи сухих элементов стрелка омметра может отклониться от исходного нулевого значения.

69. Неверно. Ток следует отнести к единице расстояния, на которое отклонился луч.

70. Неправильно. При сжатии стержня поперечное сечение наклеенной проволоочки увеличится, а ее длина уменьшится.

71. Правильно. Электроизмерительные приборы применяются в этих и еще в целом ряде областей современной техники.

72. Неверно. Так классифицируются приборы по их назначению.

73. Правильно. Вращающий момент создается в результате взаимодействия тока в рамке с магнитным полем постоянного магнита.

74. Правильно. Независимо от направления тока ферромагнитный сердечник будет втягиваться в катушку электромагнита.

75. Неверно. При передаче на значительные расстояния показания прибора искажаются вследствие помех в линии.

76. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 16.

77. Правильно. При симметричной нагрузке мощность трехфазной цепи равна утроенной мощности одной фазы; при несимметричной нагрузке два ваттметра должны быть включены на линейные токи и напряжения.

78. Неверно. Малых по сравнению с каким сопротивлением?

79. Правильно. Постоянный магнит можно заменить электромагнитом, но это нецелесообразно.

80. Правильно. Послесвечение экрана в течение времени, большего 0,05 с, позволяет наблюдать изображение исследуемого сигнала.

81. Неполный ответ.

82. Неправильно. Приведенная погрешность может быть как положительной, так и отрицательной.

83. Неверно. Магнитотвердый материал намагнитится в магнитном поле земли и сам будет влиять на показания прибора.

84. Неправильно. Вращающий момент пропорционален квадрату силы тока.

85. Неверно. При измерении медленно меняющейся величины квант времени может быть выбран достаточно большим.

86. Правильно. Независимо от схемы включения ваттметра систематическая погрешность $\delta = 1\%$.

87. Неверно. При измерении мощности двумя ваттметрами они должны включаться на линейные токи и напряжения.

88. Правильно. Поделив напряжение, отсчитанное по вольтметру, на ток в цепи, найдем сопротивление цепи между точками, к которым подсоединен вольтметр. Это сопротивление равно 10 Ом, из которых 0,1 Ом приходится на сопротивление амперметра и 9,9 Ом составляет искомое сопротивление.

89. Правильно. Все мостовые методы измерений характеризуются высокой точностью.

90. Неверно. Высота изображения на экране зависит от величины исследуемого сигнала.

91. Неверно. Сантиметр и грамм не являются основными единицами измерения в СИ.

92. Неправильно. Такой знак может быть нанесен и на шкалу вольтметра.

93. Вы ошибаетесь. Это принцип действия приборов электродинамической системы.

94. Неверно. Подумайте, изменится ли направление вращающего момента при изменении направления тока в обмотке электромагнита.

95. Неверно. Точность отсчета цифрового прибора будет выше, так как отсутствуют искажения при передаче показаний на большие расстояния.

96. Правильно: $n = 300/30 = 10$; $R_{ш} = R_A / (n - 1) = 0,09 / (10 - 1) = 0,01$ Ом.

97. Неверно. Ваттметры включают на линейные токи.

98. Неправильно. Малых по сравнению с каким сопротивлением?

99. Правильно. Отклонение светового пятна на экране пропорционально углу поворота зеркала и длине светового луча.

100. Неверно. Можно, если трубка экрана осциллографа обладает достаточным послесвечением.

101. Неполный ответ.

102. Неверно. Обратите внимание на то, что в первом случае стрелка находится в начале шкалы.

103. Неправильно. Зазор необходим для нормальной работы прибора при изменении температуры окружающей среды.

104. Правильно. Эти детали создают вращающий, демпфирующий и противодействующий моменты.

105. Это не принципиально. Помните, например, что счетчик электрической энергии позволяет отсчитывать показания в цифровой форме, но не относится к цифровым приборам.

106. Неверно. Подвижная обмотка ваттметра включается параллельно потребителю электроэнергии.

107. Неправильно. Учтите, что при наличии нулевого провода необходимо измерять мощность в каждой фазе отдельно.

108. Неверно. Однофазный счетчик имеет четыре зажима: два – для подключения к сети, два – для подключения нагрузки.

109. Вы ошибаетесь. Воспользуйтесь формулой $R_4 = R_2 R_3 / R_1$.

110. Неправильно. Учтите, что одноименные заряды отталкиваются.

111. Неверно. Вы перепутали области применения рассматриваемых методов измерений.

112. Неправильно. Приведенная цифра не имеет отношения к шкале прибора.

113. Правильно.

114. Неверно. На взаимодействии магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника основана работа прибора электромагнитной системы.

115. Неправильно. Принцип работы цифрового прибора легко позволяет осуществлять многоканальные измерения.

116. Вы ошибаетесь. Правильное решение:

$$I_{\max} = I_A (R_A + R_{\text{ш}}) / R_{\text{ш}} = 10(0,5 + 0,1) / 0,1 = 60 \text{ А.}$$

117. Неверно. Учтите, что соотношения между индуктивным и активным сопротивлениями токовой обмотки и обмотки напряжения различны.

118. Неправильно. Более удобен и привычен отсчет по шкале, у которой нуль расположен слева.

119. Неверно. Периодический процесс можно наблюдать на экране осциллографа.

120. Неверно. Если к обмотке потенциометра подвести произвольно изменяющееся напряжение, то невозможно будет установить однозначную зависимость между выходным напряжением и измеряемой физической величиной.

121. Правильно.

122. Правильно. Измерение, при котором стрелка находится в правой половине шкалы, является более точным.

123. Правильно. Зазор между керном и подпятником необходим для компенсации температурных колебаний размеров оси.

124. Неполный ответ. Вы забыли указать демпфер.

125. Правильно. Именно в этом заключается физическая сущность работы цифрового прибора и его принципиальное отличие от обычных электроизмерительных приборов.

126. Вы перепутали способы включения обмоток ваттметра.

127. Неверно. Посмотрите еще раз схемы включения ваттметров для измерения мощности в трехфазных цепях.

128. Неправильно. Вы нашли сопротивление цепи между точками, к которым подключен вольтметр.

129. Вы ошибаетесь. Посмотрите консультацию № 109.

130. Правильно. Электроны будут отталкиваться от отрицательно заряженной пластины и притягиваться к положительно заряженной пластине.

131. Неполный ответ.

132. Правильно.

133. Неверно. Прибор станет непригодным для измерений.

134. Неправильно. Вы забыли о необходимости создания демпфирующего момента.

135. Правильно. Это одно из достоинств приборов электродинамической системы.

136. Неверно. Для измерения реактивной мощности ваттметр должен быть включен по особой схеме.

137. Вы ошибаетесь. Можно ограничиться одним ваттметром.

138. Неверно. Учтите, что счетчик имеет две обмотки, причем по одной протекает ток потребителя, а к другой подводится напряжение.

139. Правильно. Одним из достоинств уравновешенного моста является отсутствие влияния напряжения питания на результат измерений.

140. Неверно. Электроны обладают отрицательным зарядом, а одноименные заряды отталкиваются.

141. Неверно. Емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости вещества, разделяющего пластины.

142. Правильно. Метод сравнения неудобен в полевых условиях, так как обычно требует сложной процедуры отсчета и дополнительных вычислений.

143. Неверно. Цифра знака прибора дана в киловольтах.

144. Неверно. Изменять конструкцию прибора нет необходимости.

145. Неверно. При отсутствии зазора между цилиндром и поршнем демпфера подвижная система прибора теряет подвижность.

146. Неверно. Вы перепутали области применения в цифровом приборе двоичной и десятичной систем счисления.

147. Неверно. Учтите, что ток течет не только через шунт, но и через параллельно ему включенный амперметр.

148. Правильно. В том случае, когда невозможно использовать естественную, создают искусственную нулевую точку.

149. Правильно. Шкалу можно сделать и обычной, усложнив механическую передачу движения от рамки к стрелке.

150. Непериодический процесс наблюдать непосредственно на экране нельзя.

151. Правильно.

152. Неполный отчет.

153. Неверно. Обратите внимание на то, что в первом случае стрелка находится в начале, а во втором – в конце шкалы.

154. Правильно. При замене упругих токоподводящих пружин из фосфористой бронзы мягкой медной фольгой исчезнет противодействующий момент и при любом токе стрелка будет отклоняться до упора.

155. Неверно. Вы забыли о необходимости создания противодействующего момента.

156. Неверно. Приборы электродинамической системы можно применять для измерений в цепях переменного тока.

157. Неверно. Электродинамический ваттметр градуируется в единицах активной мощности.

158. Неверно. Учтите, что при симметричной нагрузке мощности всех трех фаз одинаковы.

159. Правильно. Счетчик имеет две клеммы для подключения к сети (генераторные клеммы) и две клеммы для подключения нагрузки.

160. Правильно: $R_4 = R_2 R_3 / R_1 = 10 R_3 / 10 R_3 = 1 \text{ Ом}$.

161. Правильно. Электроны отталкиваются от отрицательно заряженной пластины и притягиваются к положительно заряженной.

162. Правильно.

163. Правильно.

164. Неверно. Это принцип действия прибора электромагнитной системы.

165. Неправильно. Прибор электромагнитной системы можно использовать для измерений как в цепях переменного, так и в цепях постоянного тока.

166. Правильно. Цифровые показания прибора при передаче на большие расстояния сохраняют свое исходное значение даже при действии помех в линии.

167. Вы ошибаетесь. Правильное решение: $n = 300/30 = 10$; $R_{ш} = R_A / (n - 1) = 0,09 / (10 - 1) = 0,01$.

168. Неверно. Ваттметры включают на фазные напряжения.

169. Правильно. В этом случае сопротивлением амперметра можно пренебречь по сравнению с измеряемым сопротивлением и считать, что подсчитанное сопротивление равно искомому.

170. Неверно. Прибор будет работать, но электромагнит менее удобен в эксплуатации, чем постоянный магнит.

171. Неправильно. См. консультацию № 80.

172. Неверно. Счетчик используют для измерения электрической энергии, полученной из сети.

173. Неправильно. Учтите, что класс точности равен приведенной погрешности прибора.

174. Неверно. Вспомните, что токоподводящие пружинки служат также для создания противодействующего момента.

175. Вы ошибаетесь. На взаимодействии проводников, по которым протекает электрический ток, основана работа приборов электродинамической системы.

176. Неверно. Приборы электродинамической системы можно применять для измерений в цепях постоянного тока.

177. Правильно. Угол отклонения стрелки пропорционален активной мощности.

178. Правильно. Ваттметр включается для измерения мощности в одной фазе. Общая мощность трехфазной цепи равна утроенной мощности одной фазы.

179. Неверно. Мощность, потребляемая нагрузкой из сети, пропорциональна скорости вращения диска.

180. Неправильно. В уравновешенном мосту ток диагонали равен нулю.

181. Неверно. Чем больше отрицательный потенциал электрода, тем меньше яркость изображения на экране. При значительном отрицательном потенциале изображение исчезает.

182. Неправильно. Емкость конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости изолятора, находящегося между пластинами.

183. Правильно.

184. Правильно.

185. Правильно.

186. Неправильно. Можно, если прибор подключить через выпрямитель.

187. Неверно. Поскольку каркас рамки не выполняет роль демпфера, его можно сделать пластмассовым.

188. Вы ошибаетесь. Амперметр включается в сеть последовательно с потребителем.

189. Неверно. См. консультацию № 233.

190. Правильно. Скорость вращения диска прямо пропорциональна мощности, потребляемой из сети.

191. Неверно. Эти токи не обязательно равны при равновесии моста.

192. Правильно. Период тока $T = m_l l = 0,02$ с. Частота тока обратна периоду и в рассматриваемом случае равна 50 Гц.

193. Неправильно. Учтите, что при прочих равных условиях магнитный поток уменьшается с увеличением воздушного зазора.

194. Неверно. Любые измерения, а не только электрические, сводятся к сравнению измеряемой величины с ее значением, принятым за единицу.

195. Вы ошибаетесь. Точность измерений зависит от точности отсчета, но характеризуется относительной погрешностью измерения.

196. Неправильно. Если бы на подвижную систему прибора действовал только вращающий момент, то стрелка отклонялась бы до упора при любом значении измеряемой величины.

197. Правильно. В приборе магнитоэлектрической системы алюминиевый каркас рамки, перемещающейся в магнитном поле, выполняет роль демпфера. Если каркас рамки сделать пластмассовым, демпфирующий момент исчезнет и отсчет показаний прибора будет затруднен.

198. Неверно. Вы забыли демпфер, без которого отсчет показаний прибора практически невозможен.

199. Правильно.

200. Неверно. Пределы измерений тока расширяются в k раз, где k – коэффициент трансформации.

201. Неправильно. Вращающий момент пропорционален мощности потребителя.

202. Правильно. Если равны разности потенциалов точек, то равны и падения напряжения между этими точками.

203. Правильно. В качестве масштаба выбирают ток, который вызывает отклонение луча на единицу длины.

204. Неверно. Амперметр служит для измерения силы электрического тока.

205. Неправильно. Учтите, что точность измерения и точность прибора характеризуются относительной и приведенной погрешностями, которые принято выражать в процентах.

206. Не полный ответ. Вы не указали противодействующий момент.

207. Правильно. Магнитоэлектрические приборы с выпрямителями используются для измерений в цепях переменного тока.

208. Правильно. В приборах электродинамической системы обычно используется воздушный демпфер, поэтому каркас рамки можно сделать пластмассовым.

209. Неверно. Внутреннее сопротивление амперметра должно быть по возможности малым.

210. Правильно.

211. Неверно. Число оборотов диска пропорционально энергии, а скорости вращения – мощности.

212. Правильно.

213. Вы ошибаетесь. Посмотрите консультацию № 192.

214. Неверно. Индуктивность дросселя зависит от величины воздушного зазора.

215. Неправильно. Вольтметр применяют для измерения напряжения.

216. Вы неправильно определили относительную погрешность измерения.

217. Правильно. Когда стрелка прибора неподвижна, демпфирующий момент, пропорциональный скорости вращения подвижной системы, равен нулю.

218. Правильно. Вращающий момент создается за счет притяжения электромагнитом ферромагнитного сердечника.

219. Правильно. В соответствии с принципом действия вольтметры и амперметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу, ваттметры – равномерную.

220. Неверно. Ваттметры электродинамической системы имеют равномерную, а вольтметры – квадратичную шкалу.

221. Неверно. Входное сопротивление вольтметра должно быть большим.

222. Неверно. Электродинамический ваттметр можно использовать для измерений мощности в цепях переменного тока.

223. Неверно. Энергия, потребляемая нагрузкой из сети, пропорциональна числу оборотов диска счетчика.

224. Неверно. Ток гальванометра может быть равен нулю и при неравенстве этих токов.

225. Правильно.

226. Правильно. При увеличении зазора между якорем и сердечником дросселя магнитный поток и потокосцепление дросселя уменьшатся даже, если ток в обмотке дросселя не изменится. Следовательно, уменьшится индуктивность дросселя.

227. Неопределенно.

228. Неверно. Точность измерения и прибора характеризуются относительными величинами и не могут быть выражены в амперах.

229. Неполный ответ. Вы не указали демпфирующий момент.

230. Неверно. Переменный ток будет создавать вращающий момент, изменяющий направление с частотой тока. Вследствие инерционности подвижной системы при любой величине тока стрелка останется неподвижной.

231. Правильно. Вы указали все детали, принципиально необходимые для работы прибора: подвижная и неподвижная катушки создают вращающий момент, пружина – противодействующий момент, демпфер – успокаивающий момент.

232. Неверно. Вольтметр включается параллельно потребителю.

233. Правильно.

234. Неверно. Учтите, что скорость вращения диска пропорциональна мощности, потребляемой из сети.

235. Неверно. Вспомните принцип работы прибора электромагнитной системы.

236. Неправильно. Учтите, что период $T = m_l l = 0,01 \cdot 2 = 0,02$ с.

237. Правильно. При сжатии стержня сжимается проволока тензометрического датчика. При этом ее длина уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается. При этом сопротивление тензометрического датчика уменьшается.

238. Правильно, для измерения активной мощности, потребляемой в электрической цепи, служит ваттметр.

239. Неверно. Приведенная погрешность прибора выражается в процентах.

240. Неправильно. См. консультацию № 217.

241. Неверно. Это принцип действия прибора магнитоэлектрической системы.

242. Вы ошибаетесь. Вольтметры и амперметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу.

243. Правильно. При таких условиях измерительные приборы вносят минимальные искажения в режим работы исследуемой схемы.

244. Неверно. Электродинамический ваттметр можно использовать для измерения мощности в цепях постоянного тока.

245. Правильно.

246. Неверно. Напряжение питания не входит в условие равновесия моста.

247. Неправильно. При уменьшении величины отрицательного потенциала управляющего электрода яркость изображения увеличивается.

248. Правильно.

К главе 12

1. Принимая во внимание правила маркировки проводов, определяем:

А-25 – алюминиевый многопроволочный провод с площадью поперечного сечения 25 мм^2 ;

АС-25 – сталеалюминиевый многопроволочный провод с площадью поперечного сечения 25 мм^2 .

Поскольку площади поперечного сечения проводов одинаковы, а прочность стали значительно превосходит прочность алюминия, то заключаем, что провод АС-25 прочнее, чем провод А-25.

2. Приведенных данных вполне достаточно для решения задачи:

$$\Delta U = I \cdot 2 R \cos \varphi = 10 \cdot 2 \cdot 0,05 \cos 60^\circ = 0,5 \text{ В.}$$

3. Правильно. При увеличении площади поперечного сечения провода в 4 раза его диаметр увеличивается в 2 раза, и рассматриваемая задача сводится к предыдущей.

4. Правильно. Находим ток плавкой вставки по формуле

$$I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{a} = \frac{180}{1,8} = 100 \text{ А,}$$

где $a = 1,8$, так как длительность пуска двигателя превышает 10 с.

Выбираем стандартный предохранитель с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим условию

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a}.$$

Таким является предохранитель с номинальным током 100 А.

5. Правильно. В сухом помещении допускается напряжение прикосновения 65 В. В помещениях с повышенной влажностью, в металлических кабинах, котлах и т.д. считаются опасными все напряжения, превышающие 12 В.

6. Дополнительное заземление корпуса двигателя можно сделать, но это не улучшит и не ухудшит условий безопас-

ности обслуживающего персонала. Поэтому делать такое заземление нецелесообразно – это неоправданная затрата материалов и труда.

7. Вы ошибаетесь. Чем выше напряжение сети, тем при прочих равных условиях меньше расход металла на провода. Объяснение этой закономерности прочтите в консультациях к первой и второй строках ответов.

8. В цепи переменного тока потеря напряжения и падение напряжения в линии – это разные величины. Потеря напряжения равна разности действующих значений напряжения в начале и в конце линии и при условиях задачи действительно составляет 10 В:

$$\Delta U = U_1 - U = 230 - 220 = 10 \text{ В.}$$

Что касается падения напряжения, то для его определения приведенных данных недостаточно. Необходимо знать либо комплексы напряжений в начале и в конце линии, либо комплексы тока в линии и ее полного сопротивления.

9. Вы ошибаетесь. Чтобы правильно ответить на вопрос, используйте следующие рассуждения:

– найдите массу двухпроводной линии;

– найдите, какой процент составляет масса четырехпроводной линии от массы двухпроводной при условии, что экономия в массе равна 71%;

– найдите массу четырехпроводной линии (в кг).

10. Правильно. Для защиты осветительной сети выбирается стандартная вставка, номинальный ток которой равен или превышает номинальный ток нагрузки.

11. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации к третьему ответу.

12. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$I_{\text{чел}} = I_{\text{кз}} \frac{R_3}{R_3 + R_{\text{чел}}} = 30 \frac{10}{10 + 2990} = 100 \text{ мА.}$$

Здесь R_3 – сопротивление заземлителя; $R_{\text{чел}}$ – сопротивление тела человека; $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания на землю.

13. Реактивной мощностью определяется только реактивная составляющая тока в линии. Для того чтобы определить полный ток и плотность тока в проводах линии, необходимо знать полную мощность S .

14. Вы ошиблись в вычислениях. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к первому ответу.

15. Точка пересечения ампер-секундной характеристики с осью токов соответствует случаю, когда плавкая вставка

перегорает за время, равное нулю. Из физических соображений ясно, что вставка не может перегореть мгновенно.

16. Допустимый ток провода определите из условия

$$I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{вн}}, \quad \text{где } I_{\text{вн}} = 60 \text{ А.}$$

17. При параллельном соединении сопротивлений ток распределяется обратно пропорционально величинам этих сопротивлений:

$$I_{\text{чел}} = I_{\text{кз}} \frac{R_3}{R_3 + R_{\text{чел}}} = 30 \frac{10}{10 + 2990} = 100 \text{ мА.}$$

18. Правильно. При мощности сети, меньшей 100 кВт, сопротивление заземлителя (безразлично, искусственного или естественного) должно быть не большим 10 Ом. Тем более можно использовать в этих условиях заземлитель с сопротивлением 1 Ом.

19. Правильно. Количество труб определяем по формуле

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3 \eta},$$

положив $R_{\text{тр}} = 45 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $\eta = 0,75$

Коэффициент использования трубы η определен из таблицы приближенно по найденному приближенному значению n .

Таким образом,

$$n = \frac{45}{10 \cdot 0,75} = 6.$$

20. Основная часть электроэнергии, вырабатываемой и потребляемой в народном хозяйстве, передается от генераторов к потребителям при помощи сетей трехфазного тока. Широко применяются как высоковольтные (десятки и сотни киловольт), так и низковольтные (220/127, 380/220, 660/380 В) трехфазные сети.

21. Вы ошиблись в вычислениях. Вот правильное решение:

$$\Delta U \% = \frac{U_1 - U}{U} = \frac{26 - 25}{25} = 0,04 = 4\%.$$

22. Правильно. По условию задачи напряжения на потребителях (т.е. фазные напряжения) одинаковы. При со-

единении таких потребителей звездой линейное напряжение будет в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при соединении тех же потребителей треугольником. Поскольку масса линии обратно пропорциональна квадрату напряжения, она будет при соединении звездой (случай б) в 3 раза меньше, чем при соединении треугольником.

23. Правильно:

$$I_{\text{вн}} = \frac{I_{10}}{2,5} = \frac{25}{2,5} = 10 \text{ А.}$$

24. Степень воздействия электрического тока на организм человека зависит от мощности источника, но только потому, что маломощный источник не может создать больших токов. Непосредственное физиологическое воздействие на организм оказывает ток, который представляет собой движение заряженных частиц, нарушающих нормальную структуру тканей организма.

25. Правильно. Для простоты рассуждений следует пренебречь сопротивлением изоляции провода. Тогда ток утечки распределится обратно пропорционально сопротивлениям тела человека и заземлителя:

$$I_{\text{чел}} = I_y \frac{R_3}{R_3 + R_{\text{чел}}} = 76 \frac{10}{10 + 2600} = \frac{38}{135} \text{ мА.}$$

Если учесть сопротивление изоляции провода, то найденная величина тока, протекающего через тело человека, будет еще меньше.

26. Правильно. Электрическая сеть служит для передачи электрической энергии от электрических станций к объектам, потребляющим электрическую энергию, и для распределения энергии по группам потребителей и отдельным потребителям.

Электрическая сеть составляет часть энергетической системы. Сеть состоит из линий электропередачи (ЛЭП) и трансформаторных подстанций (ТП). На территории России созданы мощные энергосистемы, охватывающие огромные районы и включающие десятки крупных электростанций.

Построены линии дальней электропередачи напряжением 35, 110, 220, 330, 500 кВ и более. Проектируются линии электропередачи на постоянном токе с напряжением 750, 1000 кВ и более.

В последние годы введена в действие международная энергосистема, в которую входят энергетические системы Российской Федерации и некоторых соседних государств.

27. Площадь поперечного сечения проводов линии электропередачи определяется электрическим расчетом, на основании данных о тепловом режиме работы линии, допустимой потере напряжения и выбранных предохранителей.

28. При прочих равных условиях площадь поперечного сечения проводов линии электропередачи обратно пропорциональна допустимой величине потери напряжения в линии:

$$S = \frac{100IP}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2}.$$

Следовательно, при уменьшении допустимой потери напряжения в 2 раза площадь поперечного сечения провода увеличится в 2 раза и станет равной 20 мм².

29. Для расчета линии обычно используется действующее значение напряжения, которое приводится на щитке номинальных данных генератора или трансформатора.

30. Правильно. Площадь поперечного сечения провода обратно пропорциональна величине допустимой потери напряжения в линии. Поэтому при уменьшении в 2 раза допустимой потери напряжения расчетное сечение провода увеличится в 2 раза.

31. Вспомните, что I_{\min} – это наименьший из токов, которые могут расплавить вставку. Токи, меньшие этой величины, вставку не расплавляют.

32. Наименьший ток, при котором произойдет отключение линии, находим из условия

$$I_{\min} \leq \frac{1,5}{1,25} I_{\text{доп}}.$$

Таким образом,

$$I_{\min} = \frac{1,5}{1,25} \cdot 75 = 90 \text{ А.}$$

33. Правильно. Ток, протекающий через тело человека, может быть определен по известной формуле

$$I_{\text{чел}} = I_y \frac{R_{\text{из}}}{R_{\text{из}} + R_{\text{чел}}} = 76 \frac{5 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3} = 50 \text{ мА.}$$

34. Вы ошиблись. Для подсчета сопротивления трубы воспользуйтесь формулой

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \frac{\rho}{l},$$

где ρ — удельное сопротивление почвы, равное для суглин-ка 100 Ом · м; l — длина трубы в метрах.

35. Электрический расчет необходим для определения пригодности линии к эксплуатации, однако одного этого расчета недостаточно. Необходимо произвести механический расчет прочности линии и дать экономическую оценку условий ее эксплуатации.

36. Вы ошиблись в вычислениях.

$$\Delta U \% = \frac{200 l P}{\sigma \cdot S \cdot U^2}.$$

37. Вы ошибаетесь.

38. Вы ошибаетесь. При защите от коротких замыканий номинальный ток плавкой вставки не должен превышать утроенного значения допустимого по нагреву тока провода. В рассматриваемом случае это условие выполняется: $35 < 3 \times 15$. Следовательно, провод с допустимым по нагреву током 15 А можно использовать для питания нагрузки в цепи, где установлен указанный в условии задачи предохранитель.

39. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации ко второму ответу.

40. Вы ошибаетесь. Условия срабатывания защиты из плавких предохранителей изложены в консультациях к первому и второму ответам на этот вопрос.

41. Площади поперечного сечения рассматриваемых многопроволочных проводов действительно одинаковы (25 мм²). Поскольку прочность стали значительно выше прочности алюминия, то ясно, что прочность сталеалюминиевого провода АС-25 больше, чем прочность алюминиевого провода А-25.

42. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации к первому ответу.

43. Поскольку левая часть уравнения теплового равновесия уменьшилась в 4 раза, а правая увеличилась в 2 раза, для сохранения равновесия необходимо разность температур провода и окружающей среды уменьшить в 8 раз.

44. Плавкую вставку для защиты групповой нагрузки выбираем так, чтобы она удовлетворяла двум условиям:

$$1) I_{\text{вн}} \geq m \sum_{k=1}^n I_{\text{рк}} ;$$

$$2) I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{(\text{пуск}) \text{ макс}} + m \sum_{k=1}^{n-1} I_{\text{рк}}}{2,5} .$$

Принимаем $m = 1$ (потребители работают одновременно).

Находим:

$$1) I_{\text{в}} = I_{\text{р. двиг}} + I_{\text{свет}} = 6 + 20 = 26 \text{ А};$$

$$2) I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}} + I_{\text{свет}}}{2,5} = \frac{30 + 20}{2,5} = 20 \text{ А} .$$

Стандартным предохранителем с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим названным условиям, является предохранитель на 35 А.

При расчетах использовались следующие обозначения:

$I_{\text{р. двиг}}$ – рабочий ток двигателя;

$I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток двигателя;

$I_{\text{свет}}$ – номинальный ток световой нагрузки.

45. Алюминиевые провода имеют удельную электропроводность примерно в 8 раз большую, чем стальные. Однако их прочность значительно уступает прочности стальных проводов.

46. Вы определили абсолютное значение падения напряжения в линии. Для определения потери напряжения приведенных данных недостаточно: нужно знать еще угол ϕ сдвига по фазе между напряжением и током в нагрузке.

Тогда примерное значение потери напряжения находится по формуле

$$\Delta U \approx I \cdot 2 R \cdot \cos \phi .$$

47. Учтите, что масса двухпроводной линии в 2 раза больше, чем масса одного провода.

48. Воспользуйтесь формулой

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a},$$

где $a = 2,5$, так как по условию задачи длительность пуска двигателя не превышает 10 с.

49. Переменный ток невысокой частоты оказывает на организм человека большее физиологическое воздействие, чем постоянный ток при прочих равных условиях.

50. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации к первому ответу.

51. Для определения примерного количества труб, необходимого для заземления, делим сопротивление трубы на сопротивление заземлителя, равное 10 Ом, так как по условию задачи мощность сети меньше 100 кВт:

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3} = \frac{45}{10} = 4,5.$$

Округляем полученный результат до 5. Полученное значение n используем для определения коэффициента η .

52. Воздушные сети широко применяются как для передачи электроэнергии на дальние расстояния, так и для электроснабжения отдельных объектов в сельской местности. Монтаж и эксплуатация таких сетей относительно дешевы, расходы на изоляцию невелики: для прокладки линий применяются голые провода. Однако воздушные сети не всегда применимы. В условиях города или внутри помещений передача электроэнергии осуществляется при помощи линий других типов.

Найдите более полный ответ.

53. Вы не учли, что потеря напряжения вызывается двумя проводами.

54. По условию задачи напряжения на потребителях одинаковы, следовательно, одинаковы фазные напряжения в случаях a и b . Но тогда в случаях a и b различны линейные напряжения и масса линий электропередачи, которые существенным образом зависят от линейных напряжений.

55. Воспользуйтесь эмпирической формулой

$$I_{\text{вн}} = \frac{k\sqrt{d^3}}{2,5},$$

где d – диаметр плавкой вставки в мм; $k = 80$, так как вставка изготовлена из меди.

56. Правильно. Непосредственное физиологическое воздействие на организм человека оказывает ток, при протекании которого разрушаются ткани организма.

Поэтому в качестве поражающего фактора указывают именно величину тока. Правилами техники безопасности безусловно опасным считается ток величиной 50 мА.

Если известно сопротивление кожных покровов человека, то можно определить опасное напряжение и мощность источника, необходимую для поражения человека.

57. Правильно. Заземляются только те части электротехнических установок, которые изолированы от токоведущих частей. Следовательно, токоведущие части соединяются с землей только в аварийном режиме, когда нарушается изоляция.

58. Все перечисленные задачи решаются в электроэнергетической системе, куда электрическая сеть входит как часть. Электрическая сеть служит только для передачи энергии от электростанций к потребителям.

Производство электроэнергии осуществляется при помощи турбогенераторов на тепловых станциях и гидрогенераторов на гидростанциях. Эти машины преобразуют энергию топлива или падающей воды в электрическую энергию.

В потребителях электрическая энергия преобразуется в другие виды: механическую, тепловую, световую, химическую энергию и т.д.

Более подробные сведения относительно производства, передачи и потребления электроэнергии прочтите в консультациях к предыдущим ответам.

59. В результате электрического расчета воздушной сети определяются площади поперечного сечения проводов, номинальные токи предохранителей, количество и размеры заземлителей.

60. Такой вес имеет двухпроводная линия. При указанных условиях трехпроводная линия будет легче двухпроводной. Применение трехфазного тока позволяет получить экономию цветного металла в размере 25%.

61. Правильно. По определению I_{\min} – это наименьший из токов, которые расплавляют вставку. Следовательно, токи, величина которых еще меньше, вставку не расплавят, а токи, большие, чем I_{\min} , заведомо расплавят ее и тем быстрее, чем больше ток.

62. При токе 80 А предохранитель не отключит линию от сети. Отключение линии произойдет при токе

$$I_{\min} = \frac{1,5}{1,25} I_{\text{доп}} = \frac{1,5}{1,25} \cdot 75 = 90 \text{ А.}$$

63. Правильно. Для определения тока и плотности тока в проводах линии нужно знать полную мощность потребителей S . Если задана активная мощность потребителей P , то необходимо задать также и коэффициент мощности $\cos \varphi$. Тогда полная мощность определяется по формуле

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}.$$

64. Вы ошиблись в вычислениях. В формулу

$$S = \frac{100 I P}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2}$$

длину следует подставлять в метрах, активную мощность в ваттах, удельную проводимость в м/Ом · мм², напряжение в вольтах.

65. Правильно. Вставка не может быть расплавлена током, равным нулю, и не может перегореть мгновенно, за время, равное нулю.

66. Правильно. Допустимый ток провода определяется из условия

$$I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{вн}} = 1,25 \cdot 60 = 75 \text{ А.}$$

67. Ток, протекающий через тело человека, определяем по формуле

$$I_{\text{чел}} = I_y \frac{R_{\text{из}}}{R_{\text{из}} + R_{\text{чел}}} = 76 \frac{5 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3} = 50 \text{ мА.}$$

68. При мощности сети, меньшей 100 кВт, сопротивление заземлителя (искусственного или естественного) не должно превышать 10 Ом. Следовательно, естественные заземлители с общим сопротивлением 1 Ом в рассматриваемом случае можно использовать без всяких переделок.

69. Это неполный ответ. Для определения пригодности линии к эксплуатации необходимо произвести помимо экономического электрической и механической расчеты.

70. Вы ошиблись в вычислениях. Посмотрите правильное решение задачи в консультациях к первому и второму ответам.

71. Правильно. Независимо от материала предохранительной вставки ее всегда можно рассчитать таким образом,

что она будет перегорать раньше, чем температура защищаемого провода превысит допустимую.

72. В качестве критерия возможности использования того или иного провода в заданных условиях примите соотношение

$$I_{\text{вн}} \leq 3I_{\text{доп}}.$$

73. Вы ошиблись. Для определения тока утечки следует воспользоваться законом Ома:

$$I_y = \frac{U}{R_{\text{из}}} = \frac{380}{5 \cdot 10^3} = 0,076 \text{ А} = 76 \text{ мА}.$$

74. При мощности сети, превышающей 100 кВт, сопротивление заземлителя не должно превышать 4 Ом. Чем больше мощность сети, тем меньше должно быть сопротивление заземлителя. Это объясняется тем, что с увеличением мощности сети увеличиваются токи утечки, и необходимо уменьшать относительную долю тока утечки, проходящую через тело человека.

75. Линия из изолированных проводов, обеспечивающая питание подвижного электрокомбайна, не может обеспечить необходимой надежности. Целесообразнее использовать кабельную линию.

76. Вы ошиблись в вычислениях. Посмотрите правильное решение в консультации к первому ответу.

77. Вы были бы правы, если бы правая часть уравнения теплового равновесия увеличилась в 2 раза, а левая осталась неизменной. Но в условиях предыдущей задачи левая часть уравнения уменьшилась в 4 раза. Вы этого не учли.

78. Правильно. Развернутое решение задачи приведено в консультации к первой строке ответов.

79. Вы ошибаетесь. Максимальный ток, который может создать рассматриваемый источник электроэнергии (при нулевом сопротивлении нагрузки), равен

$$I = \frac{E}{R_0} = \frac{3000}{10^6} = 0,003 \text{ А} = 3 \text{ мА}.$$

Если учесть электрическое сопротивление тела человека, то даже в том случае, когда человек прикоснется непосредственно к зажимам источника, через тело человека потечет ток несколько меньший 3 мА. Такой ток безопасен.

80. Если заземлить корпус двигателя, не соединенный с заземленной нейтралью, то получится схема, рассмотренная в первой задаче этой карточки.

Мы установили, что такое заземление недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения обслуживающего персонала.

81. Вы ошиблись. Количество труб следует определить по формуле

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3 \eta},$$

положив $R_{\text{тр}} = 45 \text{ Ом}$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$; $\eta = 0,75$.

Значение коэффициента использования трубы определяем приближенно по найденному ранее приближенному значению n .

82. Цифра в обозначении многопроволочных сталеалюминиевых проводов действительно обозначает площадь поперечного сечения провода в мм^2 .

Что касается однопроволочных стальных проводов, то последняя цифра в их маркировке обозначает диаметр провода в мм^2 . Поэтому площадь поперечного сечения однопроволочного стального провода ПСД-04 определяем по формуле

$$S = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 4\pi \text{ (мм}^2\text{)}.$$

83. Правильно. Для определения потери напряжения нужно знать еще угол ϕ сдвига по фазе между напряжением и током нагрузки.

84. Левая часть уравнения теплового равновесия пропорциональна сопротивлению провода. Если диаметр провода увеличить в 2 раза, то площадь его поперечного сечения увеличится в 4 раза, а сопротивление при прочих равных условиях уменьшится в 4 раза (сопротивление провода обратно пропорционально площади его поперечного сечения). Следовательно, левая часть уравнения теплового равновесия уменьшилась в 4 раза.

85. Правильно. Для того чтобы предохранитель не отключал двигатель от сети при пуске, номинальный ток плавкой вставки должен удовлетворять условию

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a},$$

где $a = 2,5$ при длительности пуска, не превышающей 10 с.
Находим

$$I_{\text{вн}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{a} = \frac{30}{2,5} = 12 \text{ А.}$$

Выбираем ближайший стандартный предохранитель с номинальным током, удовлетворяющим указанному выше условию

$$I_{\text{вн}} = 15 \text{ А.}$$

86. При прочих равных условиях высокочастотные токи менее опасны, чем переменный ток невысокой частоты.

87. Помимо внутренних сетей объектов для передачи электроэнергии используются воздушные и кабельные сети. Воздушные сети применяются для передачи электроэнергии на дальние расстояния и в сельской местности; кабельные – в крупных городах и в некоторых других случаях.

Таким образом, выбранный ответ не является полным.

88. Вы ошиблись. Учитывая, что потеря напряжения создается в двух проводах линии и, применяя закон Ома, находим:

$$\Delta U = I \cdot 2R = 10 \cdot 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ В.}$$

89. Чтобы три одинаковых потребителя находились в равных условиях, линейное напряжение в случае *б* должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем напряжение между проводами линии в случае *а*.

Таким образом,

$$S_{\text{двухпров}} = \frac{200IP}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2};$$

$$S_{\text{трехпров}} = \frac{100IP}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot (\sqrt{3}U)^2}.$$

Сравнивая эти формулы, устанавливаем, что

$$S_{\text{двухпров}} = 6S_{\text{трехпров}}.$$

Масса проводов пропорционален площади их поперечного сечения. Если обозначить массу одного провода трехпроводной линии через m , то масса одного провода двухпроводной линии будет $6m$, а масса двух проводов $12m$. Масса трех проводов трехпроводной линии равна $3m$.

Следовательно, при заданных условиях масса двухпроводной линии в 4 раза больше массы трехпроводной линии.

90. Правильно:

$$I_{\text{вн}} = \frac{k\sqrt{d^3}}{2,5} = \frac{80\sqrt{1^3}}{2,5} = 32 \text{ А.}$$

91. Для передачи электроэнергии широкое применение находят как сети высокого, так и сети низкого напряжения. Высоковольтные линии электропередачи с расчетным напряжением в десятки и сотни киловольт применяются для передачи электроэнергии на дальние расстояния. За счет повышения напряжения достигается резкое снижение тепловых потерь в линии. Действительно: при заданной мощности линии $P = UI$ увеличение напряжения ведет к уменьшению тока, а тепловые потери пропорциональны квадрату силы тока (закон Джоуля — Ленца).

Для распределения электроэнергии по отдельным потребителям применяются сети с напряжением до 1000 В. При небольшой длине линии потери невелики, поэтому расчетное напряжение можно выбрать небольшим. Снижение напряжения позволяет обеспечить безопасность обслуживающего персонала, уменьшить вес и стоимость изоляционных деталей.

В последние годы значительно возросло потребление электроэнергии в сельском хозяйстве.

92. На рисунке изображена однолинейная схема четырехпроводной линии. На однолинейных схемах количество проводов линии указывается соответствующим количеством черточек, нанесенных вблизи условного изображения источника питания.

93. Из рассмотрения формул для подсчета сечения проводов линии электропередачи следует, что площадь поперечного сечения проводов обратно пропорциональна квадрату напряжения.

Поэтому при увеличении напряжения площадь сечения уменьшается, следовательно, уменьшается и масса линии.

94. Активной мощностью определяется только активная составляющая тока в линии. Для того чтобы определить полный ток и плотность тока в проводах линии, необходимо знать полную мощность S .

Если задана активная мощность P , то для расчета сети необходимо задать также коэффициент мощности потреби-

телей $\cos \varphi$. Тогда полная мощность определяется по формуле

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}.$$

95. Вы ошиблись в вычислениях. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к первому ответу.

96. Для того чтобы ампер-секундная характеристика имела общую точку с осью токов, необходимо, чтобы плавкая вставка перегорала мгновенно; это невозможно.

Для того чтобы ампер-секундная характеристика пересекла ось времени, необходимо, чтобы плавкая вставка расплавлялась током, равным нулю; это тоже невозможно.

97. Правильно. Провод с допустимым по нагреву током 10 А использовать при заданных условиях нельзя. Утроенное значение этого тока меньше, чем номинальный ток плавкой вставки: $3 \cdot 10 < 35$. Это означает, что при коротком замыкании провод нагреется до опасной температуры раньше, чем перегорит плавкая вставка предохранителя.

Провод с допустимым по нагреву током 20 А в указанных условиях использовать можно, так как утроенное значение этого тока превышает номинальный ток плавкой вставки: $3 \cdot 20 > 35$.

98. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к третьему ответу.

99. При мощности сети, равной 100 кВт, сопротивление заземлителя не должно превышать 4 Ом.

100. Поливинилхлоридные оболочки в последние годы находят самое широкое применение для изоляции проводов и кабелей.

101. Вы ошиблись в вычислениях. Посмотрите правильное решение в консультации к первому ответу.

102. Из условия теплового равновесия провода вытекает, что ток пропорционален площади поперечного сечения провода, возведенной в степень $\frac{3}{4}$. Следовательно, для сохранения теплового равновесия при увеличении площади сечения в 2 раза ток должен увеличиться в $\sqrt[4]{2^3} = \sqrt[4]{8}$ раз.

103. Надо выбрать стандартный предохранитель с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим условиям, которые приведены в основном тексте.

104. Правильно. Обозначим удельную проводимость изоляции, т.е. проводимость изоляции, приходящуюся на 1 м длины провода, через γ_0 . Проводимость изоляции всего

провода обозначим через $Y_{\text{из}}$; сопротивление изоляции всего провода — $R_{\text{из}}$; длину провода — l . Тогда

$$y_{\text{из}} = y_0 l = 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{y_{\text{из}}} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

105. В трехпроводной сети трехфазного тока нейтральная точка генератора не заземляется из соображений безопасности обслуживающего персонала. Поэтому при пробое изоляции и соединении одной фазы линии с заземленным корпусом двигателя несколько возрастут токи утечки, но величина этих токов будет совершенно недостаточной для срабатывания защиты из плавких предохранителей.

106. Хлопчатобумажная пряжа, пропитанная специальными составами, широко применяется для изоляции кабелей и проводов.

107. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации к первому ответу.

108. Правильно. При увеличении длины провода в равной степени (прямо пропорционально) увеличатся его сопротивление и площадь боковой поверхности. Поскольку сопротивление провода входит в левую часть уравнения теплового равновесия, а площадь боковой поверхности — в правую часть, тепловой режим и температура провода не изменяется.

109. Плавкая вставка должна удовлетворять двум условиям:

$$1) I_{\text{вн}} \geq m \sum_{k=1}^n I_{\text{рк}};$$

$$2) I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск. макс}} + m \sum_{k=1}^{n-1} I_{\text{рк}}}{2,5}.$$

Принимаем $m = 1$, так как потребители работают одновременно.

Находим:

$$1) I_{\text{вн}} = I_{\text{р. двиг}} + I_{\text{свет}} = 30 + 20 = 50 \text{ А};$$

$$2) I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}} + I_{\text{свет}}}{2,5} = \frac{180 + 20}{2,5} = 80 \text{ А}.$$

Здесь обозначены:

$I_{\text{р. двиг}}$ — рабочий ток двигателя; $I_{\text{пуск}}$ — пусковой ток двигателя; $I_{\text{свет}}$ — номинальный ток световой нагрузки.

Стандартным предохранителем с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим названным условиям, является предохранитель на 80 А.

110. Вы ошибаетесь. Максимальный ток, который создает рассматриваемый источник электроэнергии при коротком замыкании, равен

$$I = \frac{E}{R_0} = \frac{3000}{10^6} = 0,003 \text{ А} = 3 \text{ мА} .$$

Во всех других случаях ток будет еще меньше. Такой ток для человека не опасен.

111. Вы правильно подсчитали площадь поперечного сечения однопроволочного стального провода ПСД04, так как в маркировке этого провода указан его диаметр.

Что касается многопроволочных проводов, то в их маркировке указывается непосредственно площадь поперечного сечения в мм². Это удобнее, так как иначе пришлось бы указывать количество проволок и диаметр каждой из них.

Следовательно, площадь поперечного сечения многопроволочного сталеалюминиевого провода АС-50 равна 50 мм².

112. Вы нашли абсолютное значение падения напряжения в линии. Для определения потери напряжения необходимо найденную цифру умножить на $\cos \varphi$, где $\varphi = 60^\circ$ — заданный угол сдвига по фазе между током и напряжением.

113. Левая часть уравнения теплового равновесия прямопропорциональна сопротивлению провода, которое уменьшается, а не увеличивается при увеличении диаметра провода.

114. Вы ошиблись. Вот правильное рассуждение: определяем ток плавкой вставки по формуле

$$I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{a} = \frac{180}{1,8} = 100 \text{ А},$$

здесь $a = 1,8$, так как длительность пуска превышает 10 с; выбираем ближайший стандартный предохранитель с номинальным током, удовлетворяющим условию

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a} ;$$

таким является предохранитель 100 А.

115. Наибольшее физиологическое воздействие на организм человека при прочих равных условиях оказывает переменный ток невысокой частоты, в частности переменный ток наземных энергосистем с частотой 50 Гц.

116. При заданной мощности сети $P = UI$ ток в проводах тем больше, чем меньше расчетное напряжение линии. Чтобы не превысить допустимую плотность тока в проводах или допустимую потерю напряжения в линии при увеличенном токе, придется выбрать провода с большим поперечным сечением.

117. Правильно. Потеря напряжения равна разности действующих значений напряжения в начале и в конце линии. Для определения падения напряжения необходимо знать выражения напряжений в начале и в конце линии в векторной форме и найти их векторную разность. Падение напряжения можно также определить, если известны комплекс тока в линии и комплекс полного сопротивления проводов линии.

118. Правильно. При равенстве линейных напряжений в случаях a и b экономия в массе составила бы 25%, как это показано в основном тексте.

Но по условию задачи потребители находятся в равных условиях, следовательно, напряжения на них в обоих случаях одинаковы. При этом линейное напряжение в случае b должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем напряжение между проводами линии в случае a .

Чем больше напряжение линии электропередачи, тем меньше масса этой линии. Таким образом, масса линии b будет меньше массы линии a не на 25%, а на значительно большую величину. Подробное изложение этого вопроса можно найти в консультации к первой строке ответов.

119. Выбранная вставка перегорит при номинальном режиме работы сети.

120. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{380}{5000} = 0,076 \text{ А.}$$

121. Правильно. Сталеалюминиевые провода содержат стальные и алюминиевые нити, скрученные в плотный жгут. За счет стальных проволок обеспечивается высокая прочность, за счет алюминиевых — высокая электропроводность.

Более сложны в изготовлении биметаллические провода, у которых тоже высокая прочность сочетается с хорошей электропроводностью. Эти провода представляют собой стальную жилу, на поверхность которой электролитическим способом наносится тонкий слой (десятые доли миллиметра) меди или алюминия.

122. Вы ошибаетесь. Для определения потери напряжения приведенных данных недостаточно, нужно знать еще угол сдвига по фазе между напряжением и током нагрузки.

123. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение задачи в консультации ко второй строке ответов.

124. Для того чтобы предохранитель не отключал двигатель при пуске, номинальный ток плавкой вставки должен удовлетворять условию

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a},$$

где $a = 2,5$, так как по условию задачи длительность пуска двигателя не превышает 10 с.

Находим

$$I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{a} = \frac{30}{2,5} = 12 \text{ А}.$$

Следовательно, вставка с номинальным током 10 А будет перегорать при пуске.

125. Правильно. Наибольшее физиологическое воздействие на организм человека при прочих равных условиях оказывают переменные токи невысокой частоты.

126. Вы ошиблись. Для решения задачи воспользуйтесь формулой

$$I_{\text{чел}} = I_{\text{кз}} \frac{R_3}{R_3 + R_{\text{чел}}},$$

где $I_{\text{кз}}$ — ток короткого замыкания на землю.

127. В маркировке однопроволочных проводов указывается диаметр провода в мм. Поэтому площадь поперечного сечения однопроволочного стального провода ПСД-04 определяем по формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 4\pi \text{ мм}^2.$$

В маркировке многопроволочных проводов указывается непосредственно площадь поперечного сечения в мм², следовательно, сечение провода АС-50 имеет площадь 50 мм².

128. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$\Delta U = I \cdot 2 R \cdot \cos \varphi = 10 \cdot 2 \cdot 0,05 \cdot \cos 60^\circ = 0,5 \text{ В.}$$

129. Диаметр провода пропорционален корню квадратному из площади его поперечного сечения. Следовательно, при увеличении площади в 4 раза диаметр увеличивается в 2 раза, и рассматриваемая задача сводится к предыдущей.

130. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к первой строке ответов.

131. При определенных условиях могут быть опасными и напряжения, значительно меньшие 127 В. С другой стороны, напряжения, превышающие 6 В, но меньшие 12 В, безопасны.

132. Правильно. Сравните свое решение с решением, приведенным в консультации к первому ответу.

133. Правильно. Примерное количество труб, необходимых для заземления, подсчитываем по формуле

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3},$$

где $R_{\text{тр}} = 45 \text{ Ом}$ — найденное ранее сопротивление одной трубы; $R_3 = 10 \text{ Ом}$ — сопротивление заземлителя, установленное для сети мощностью меньше 100 кВт.

Таким образом, $n = \frac{45}{10} = 4,5$. Полученный результат округляем до 5. Округление в меньшую сторону недопустимо, так как тогда общее сопротивление заземлителя окажется большим 10 Ом.

134. Установка воздушных линий на полях для подвода энергии к электрифицированным сельскохозяйственным машинам и агрегатам нецелесообразна. Такие линии, имея большую протяженность, оказались бы очень дорогими, а многочисленные опоры затруднили бы работу сельскохозяйственных машин на полях.

135. Правильно

$$S = \frac{200 I P}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2} = \frac{200 \cdot 53 \cdot 12 \cdot 100}{53 \cdot 5 \cdot 110^2} = 40 \text{ мм}^2.$$

136. Правильно. В условиях предыдущей задачи левая часть уравнения теплового равновесия уменьшилась в 4 раза, а правая — увеличилась в 2 раза. Для сохранения равновесия необходимо разность между температурой провода и температурой окружающей среды уменьшить в 8 раз.

137. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к первой строке ответов.

138. Напряжения, превышающие 6 В, но меньшие 12 В, считаются безопасными при всех условиях.

139. Правильно. Такое заземление не ухудшает, но и не улучшает условий безопасности обслуживающего персонала, поэтому устанавливать его нецелесообразно.

140. Вы ошиблись. Количество труб, необходимых для заземления, определяем по формуле

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3},$$

где $R_{\text{тр}}$ — сопротивление одной трубы, найденное раньше; R_3 — общее сопротивление заземлителя для сети мощностью меньше 100 кВт.

Таким образом, $n = \frac{45}{10} = 4,5$. Полученный результат ок-

ругляем до 5. Найденное значение n используем для определения коэффициента использования трубы η .

141. Вулканизированная резина — один из основных изоляционных материалов. Она применяется для изоляции проводов и кабелей как самостоятельно, так и совместно с оболочками из других материалов.

142. Правильно

$$S = \frac{200 I P}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2} = \frac{200 \cdot 220 \cdot 2420}{32 \cdot 2,5 \cdot 220^2} = 40 \text{ мм}^2.$$

143. При увеличении длины провода прямо пропорционально увеличиваются сопротивление провода и площадь его боковой поверхности. При этом тепловое равновесие не нарушится, и температура провода не изменится.

144. Вы правильно выбрали плавкую вставку. Сравните свое решение с развернутым решением задачи, приведенным в консультации к первой строке ответов.

145. Вы ошиблись в вычислениях. Вот правильное решение: проводимость изоляции двухкилометрового провода в

$2 \cdot 10^3$ раз больше проводимости изоляции провода длиной 1 м, следовательно, равна $10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^{-4}$ См/м. Сопротивление изоляция провода — величина, обратная проводимости:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

146. Такое заземление не только нецелесообразно, но и недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения обслуживающего персонала. Подробнее об этом можно прочесть в консультациях к ответам на первый вопрос этой карточки.

147. Вы не учли коэффициента использования трубы, который приближенно определяется из таблицы по найденному ранее приближенному значению n .

148. Это неполный ответ. Помимо механического, необходимо произвести электрический расчет линии и экономический расчет.

149. Вы ошибаетесь. Потеря напряжения обратно пропорциональна площади поперечного сечения провода:

$$\Delta U, \% = \frac{200 I P}{\sigma \cdot S \cdot U^2}.$$

Следовательно, при увеличении площади поперечного сечения провода потеря напряжения в линии уменьшается, а не увеличивается.

150. Ток прямо пропорционален площади поперечного сечения провода, возведенной в степень $\frac{3}{4}$. Следовательно, при увеличении площади ток увеличивается, а не уменьшается.

151. Если выбрать провод с допустимым по нагреву током 10 А, утроенное значение этого тока окажется меньшим номинального тока плавкого предохранителя, установленного в сети. Таким образом, будет нарушено условие $3I_{\text{доп}} \geq I_{\text{вн}}$.

152. Воспользуйтесь законом Ома:

$$I_y = \frac{U}{R_{\text{из}}}.$$

153. Правильно. Сравните свои рассуждения с рассуждениями, приведенными в консультациях к первому и второму ответам на этот вопрос.

154. Правильно. В маркировке однопроволочных стальных проводов цифра обозначает диаметр провода в мм, поэтому поперечное сечение однопроволочного стального провода ПС-04 определяем по известной формуле

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4\pi \text{ мм}^2.$$

В маркировке многопроволочного сталеалюминиевого провода указывается непосредственно площадь поперечного сечения, следовательно, провод АС-50 имеет площадь поперечного сечения 50 мм².

Если не пользоваться этим правилом, для многопроволочных проводов пришлось бы указывать количество проволок и диаметр каждой из них, а подсчет площади поперечного сечения провода потребовал бы дополнительного времени.

155. Правильно

$$\Delta U = I \cdot 2R \cdot \cos \varphi = 10 \cdot 2 \cdot 0,05 \cdot \cos 60^\circ = 0,5 \text{ В.}$$

156. Правильно. Левая часть уравнения теплового равновесия пропорциональна сопротивлению провода, которое уменьшается в 4 раза при увеличении диаметра провода в 2 раза.

Правая часть уравнения теплового равновесия пропорциональна боковой поверхности провода:

$$F = \pi dl.$$

При увеличении диаметра провода в 2 раза площадь боковой поверхности провода также увеличивается в 2 раза.

157. Вы ошиблись. Вот правильное рассуждение: определяем ток плавкой вставки по формуле

$$I_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{a} = \frac{30}{2,5} = 12 \text{ А.}$$

Выбираем ближайший стандартный предохранитель с номинальным током, удовлетворяющим условию $I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a}$. Это предохранитель на 15 А.

158. Правильно. Площади поперечного сечения рассматриваемых проводов одинаковы (25 мм²). Поскольку прочность стали значительно выше прочности алюминия, то ясно, что сталеалюминиевый провод АС-25 прочнее алюминиевого провода А-25. Оба провода — многопроволочные.

159. Вы ошиблись в вычислениях. Вот правильное решение:

$$S = \frac{200 I P}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2} = \frac{200 \cdot 53 \cdot 12 \cdot 100}{53 \cdot 5 \cdot 100^2} = 40 \text{ мм}^2.$$

160. Левая часть уравнения теплового равновесия прямо пропорциональна сопротивлению провода, которое уменьшается, а не увеличивается при увеличении площади поперечного сечения провода

161. Надо выбирать стандартный предохранитель с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим условию

$$I_{\text{вн}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{a}.$$

162. В сухих помещениях допускаются напряжения прикосновения, значительно превышающие 36 В. Напряжения 36 В и выше считаются опасными в сырых помещениях с токопроводящими полами.

163. Такое заземление можно сделать, оно не ухудшит условий безопасности обслуживающего персонала. Но делать его нецелесообразно, так как оно не ведет к повышению безопасности.

164. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3} = \frac{45}{10} = 4,5.$$

Здесь $R_{\text{тр}} = 45 \text{ Ом}$ — найденное ранее сопротивление одной трубы; $R_3 = 10 \text{ Ом}$ — общее сопротивление заземлителя; n — количество труб, при котором общее сопротивление заземлителя равно 10 Ом.

Полученный результат округляем до 5. Найденное значение используем для определения коэффициента использования труб η .

165. Правильно. При помощи кабельной линии можно обеспечить надежное питание подвижного электрокомбайна. Воздушная линия оказалась бы слишком дорогой; кроме того, многочисленные опоры мешали бы работе сельскохозяйственных машин. Линия из изолированных проводов не обеспечила бы нужной надежности.

166. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$S = \frac{200 I P}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2} = \frac{200 \cdot 320 \cdot 2420}{32 \cdot 2,5 \cdot 220^2} = 40 \text{ мм}^2.$$

167. Длина провода не входит в уравнение теплового равновесия, поэтому при увеличении длины провода его тепловой режим не изменится.

168. Надо выбрать стандартный предохранитель с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим двум условиям, приведенным в основном тексте. Коэффициент одновременности работы потребителей m в рассматриваемом случае равен единице: потребители работают одновременно.

169. Правильно. Максимальный ток, который может создать рассматриваемый источник электроэнергии в замкнутой цепи, равен (при коротком замыкании)

$$I = \frac{E}{R_0} = \frac{3 \cdot 10^3}{10^6} = 0,003 \text{ А} = 3 \text{ мА}.$$

Во всех других случаях ток будет еще меньше. Такой ток не опасен для человека.

170. Правильно. Если заземлить корпус двигателя, не соединенный с заземленной нейтралью, то получим схему, рассмотренную в первом вопросе этой карточки. Такое заземление недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения обслуживающего персонала.

171. Воспользуйтесь формулой

$$n = \frac{R_{\text{тр}}}{R_3 \cdot \eta}, \text{ положив } R_{\text{тр}} = 45 \text{ Ом}, R_3 = 10 \text{ Ом}, \eta = 0,75.$$

Значение коэффициента использования трубы η определено приближенно из таблицы по найденному ранее приближенному значению n .

172. Правильно. Слюда — твердый диэлектрик, пластинки слюды ломаются даже при небольших изгибах, поэтому применение ее в качестве изоляции проводов и кабелей нецелесообразно. Слюда, обладающая высокой электрической прочностью, применяется для изготовления изоляционных деталей электрических приборов и машин.

173. Правильно. Потеря напряжения в линии обратно пропорциональна площади поперечного сечения проводов

$$\Delta U, \% = \frac{200 I P}{\sigma \cdot S \cdot U^2}.$$

Поэтому если площадь сечения проводов увеличивается от 40 до 50 мм², то потеря напряжения в линии соответственно уменьшается от 2,5 до 2%.

174. Правильно. Ток пропорционален $\sqrt[4]{S^3}$, следовательно, при увеличении площади поперечного сечения S в 2 раза ток должен увеличиться в $\sqrt[4]{2^3} = \sqrt[4]{8}$ раз, чтобы тепловое равновесие не нарушилось.

175. Правильно. При защите от коротких замыканий номинальный ток плавкой вставки не должен превышать утроенного значения допустимого по нагреву тока провода. В рассматриваемом случае это условие выполняется: $35 < < 3 \cdot 15$.

176. Вы ошиблись в вычислениях. Посмотрите правильное решение в консультации ко второму ответу.

177. В четырехпроводной сети трехфазного тока средняя точка генератора заземлена, а корпус каждого электродвигателя соединен с заземленной нейтралью. Поэтому пробой изоляции и соединение корпуса двигателя с фазой линии приводят к короткому замыканию одной обмотки трехфазного генератора. При этом ток в соответствующей фазе резко возрастает и срабатывает защита из плавких предохранителей, отключающая линию от источника электроэнергии.

178. Правильно. В зависимости от конкретных условий роль того или иного расчета возрастает, однако для всесторонней оценки пригодности линии к эксплуатации необходимо не только произвести расчет линии на соответствие электрическим требованиям, но также оценить ее механическую прочность и экономическую целесообразность.

179. Правильно

$$S = \frac{100IP}{\sigma \cdot \Delta U \% \cdot U^2} = \frac{100 \cdot 144 \cdot 4 \cdot 16\,000}{32 \cdot 5 \cdot 380^2} = 10 \text{ мм}^2.$$

180. Независимо от материала плавкой вставки ее сечение можно выбрать таким, что вставка будет нагреваться и плавиться раньше, чем температура проводов защищаемой линии превысит допустимую температуру.

181. Если выбрать провод с допустимым по нагреву током 20 А, то утроенное значение этого тока будет больше номинального тока плавкой вставки, установленной в цепи: $3 \cdot 20 > 35$ А. Следовательно, при коротком замыкании плавкая вставка перегорит раньше, чем произойдет нагрев провода до опасной температуры. Такой провод можно использовать для питания потребителей в рассматриваемой цепи.

182. Правильно:

$$I_y = \frac{U}{R_{из}} = \frac{380}{5 \cdot 10^3} = 0,076 \text{ А} = 76 \text{ мА}.$$

183. Правильно. Чем меньше мощность сети, тем больше может быть сопротивление заземлителя.

184. Электрическая энергия для нужд народного хозяйства производится на тепловых и гидроэлектростанциях при помощи турбогенераторов или гидрогенераторов. В этих машинах энергия топлива или падающей воды превращается в энергию трехфазного переменного тока частотой 50 Гц.

Назначение электрической сети — передача энергии от электростанции к потребителям. Электрическая сеть составляет часть электроэнергетической системы.

Следует иметь в виду, что доля энергии гидроэлектростанций в настоящее время составляет не более 10–12% от общего количестве энергии, вырабатываемой в России, а в дальнейшем начнет снижаться по мере исчерпания гидроэнергетических ресурсов.

185. Правильно, для расчета сети, как правило, используется действующее значение напряжения. Эта величина приводится на щитке номинальных данных генератора или трансформатора.

186. Примите во внимание, что площадь поперечного сечения провода линии обратно пропорциональна величине допустимой потери напряжения. Следовательно, при уменьшении допустимой потери напряжения в 2 раза площадь поперечного сечения провода увеличивается также в 2 раза.

187. Для передачи электроэнергии на дальние расстояния применяются сети с напряжением, значительно превышающим 1000 В. Чем больше расстояния, на которые передается электроэнергия, тем выше напряжение линии электропередачи. Это объясняется тем, что при заданной мощности линии $P = UI$ с увеличением напряжения уменьшается ток, а следовательно, уменьшаются и тепловые потери, пропорциональные квадрату силы тока.

Увеличение напряжения до десятков и сотен киловольт производится на повышающих трансформаторных подстанциях на передающем конце линии. На приемном конце линии напряжение уменьшается при помощи понижающих трансформаторов.

188. Количество и размеры опор определяются в результате механического расчета линий электропередачи.

189. Такую массу имела бы трехпроводная линия, если бы площадь поперечного сечения каждого ее провода равнялась площади поперечного сечения провода двухпроводной линии. На самом деле при прочих равных условиях площадь сечения провода трехпроводной линии в 2 раза меньше площади сечения проводов двухпроводной линии.

190. По условию задачи 10 А — это наименьший из токов, которые еще расплавляют вставку. Следовательно, токи, меньшие 10 А, вставку не расплавят, а токи, большие 10 А, заведомо расплавят ее.

191. Правильно. Допустимый и минимальный токи связаны соотношением

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{1,25}{1,5} I_{\text{мин}}.$$

Отсюда находим

$$I_{\text{мин}} = \frac{1,5}{1,25} I_{\text{доп}} = \frac{1,5}{1,25} \cdot 75 = 90 \text{ А}.$$

192. Низковольтные сети однофазного тока широко применяются для питания электроосветительных приборов как внутри помещений, так и снаружи.

193. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$\Delta U, \% = \frac{U_1 - U}{U} = \frac{26 - 25}{25} = 0,04 = 4\%.$$

194. Правильно. При прочих неизменных условиях масса провода пропорциональна площади его поперечного сечения. В свою очередь, площадь поперечного сечения обратно пропорциональна квадрату напряжения. Следовательно, при увеличении напряжения в 2 раза площадь поперечного сечения и масса провода уменьшаются в 4 раза.

195. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$I_{\text{вн}} = \frac{I_{10}}{2,5} = \frac{25}{2,5} = 10 \text{ А}.$$

196. Правильно: защиту от коротких замыканий осуществить проще, чем защиту от перегрузок. Последняя требует более строгого согласования номинального тока плавкой вставки и допустимого по нагреву тока провода.

Провод, защищенный от перегрузок, заведомо защищен и от коротких замыканий.

Защита от коротких замыканий еще не обеспечивает защиты от перегрузок.

197. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к четвертому ответу.

198. Вы ошиблись. Для подсчета сопротивления трубы воспользуйтесь формулой

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \frac{\rho}{l},$$

положив удельное сопротивление почвы $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

199. Кабельные сети применяются для электроснабжения объектов внутри крупных городов. Эти сети обеспечивают необходимую надежность и безопасность в условиях многоэтажной застройки. Однако кабельные сети дороги, их монтаж и эксплуатация требуют больших затрат труда и дорогостоящих материалов. Поэтому в тех случаях, когда это допустимо, применяют сети других типов.

Найдите более полный ответ.

200. Правильно. Потеря напряжения вызывается двумя проводами линии. На основании закона Ома находим:

$$\Delta U = I \cdot 2 R = 10 \cdot 2 \cdot 0,05 = 1 \text{ В}.$$

201. Обратите внимание на то, что масса линии электропередачи обратно пропорциональна квадрату линейного напряжения.

202. Вы ошиблись. Вот правильное решение:

$$I_{\text{вн}} = \frac{k\sqrt{d^3}}{2,5} = \frac{80\sqrt{1^3}}{2,5} = 32 \text{ А}.$$

203. Высокая напряженность электрического поля может представлять опасность для организма. Однако для возникновения непосредственной опасности необходима очень высокая напряженность, которая практически встречается очень редко.

При невысоких напряженностях электрического поля непосредственное физиологическое воздействие на орга-

низм человека оказывает электрический ток, который возникает, когда человек включается в электрическую цепь.

204. Такое заземление недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения человека, прикоснувшегося к заземленной детали, случайно оказавшейся под током вследствие нарушения изоляции.

Предположим, что сопротивление тела человека 2490 Ом, сопротивление заземлителя 10 Ом, ток короткого замыкания на землю 25 А.

Тогда

$$I_{\text{чел}} = I_{\text{кз}} \frac{R_3}{R_3 + R_{\text{чел}}} = 25 \frac{10}{10 + 2490} = 0,1 \text{ А} = 100 \text{ мА}.$$

Ток 100 мА смертельно опасен для человека.

205. Правильно. При заданной мощности сети $P = UI$ ток в проводах тем меньше, чем выше расчетное напряжение линии. При меньшем токе допустимая плотность тока в проводах или допустимое падение напряжения в линии могут быть обеспечены при меньшем поперечном сечении проводов, и следовательно, при меньшем расходе металла на провода.

206. Потерю напряжения легко определить, используя приведенные данные. Для этого достаточно из действующего значения напряжения в начале линии вычесть действующее значение напряжения в конце линии:

$$\Delta U = U_1 - U = 230 - 220 = 10 \text{ В}.$$

Что касается падения напряжения, то в цепи переменного тока оно не равно потере напряжения, и приведенных данных для его определения недостаточно. Чтобы найти падение напряжения, надо знать комплексы напряжений в начале и в конце линии, или комплексы тока в линии, и ее полное сопротивление:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U} = iZ.$$

207. Вы ошибаетесь. Для уяснения вопроса прочтите консультацию к первой строке ответов.

208. Плавкая вставка должна отключать защищаемый участок сети только при возникновении аварийного режима (перегрузки, короткое замыкание). Вставка с номинальным током 10 А отключит рассматриваемую сеть и в

отсутствие аварийного режима, например, при нормальной нагрузке 12 А.

209. Правильно:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{380}{5000} = 0,076 \text{ А} = 76 \text{ мА} .$$

210. Правильно. Сравните свои рассуждения с подробным объяснением, приведенным в консультации к первому и второму ответам.

211. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации к первой строке ответов.

212. Сети постоянного тока находят широкое применение в системах энергоснабжения подвижных объектов (автомобиль, трактор, самолет и др.), в которых предусмотрена параллельная работа генераторов с аккумуляторными батареями.

Линии, питаемые выпрямленным током, используются для передачи энергии электротранспортным средствам (поезда метро, электропоезда, трамваи, троллейбусы и др.).

Для передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния используются высоковольтные (500 кВ и выше линии постоянного тока).

Низковольтные сети постоянного тока применяются в электрохимии и электрометаллургии.

213. Правильно, на однолинейных схемах линий электропередачи количество проводов помечается черточками, нанесенными вблизи условного изображения источника питания.

214. Обратите внимание на то, что площадь поперечного сечения провода линии электропередачи обратно пропорциональна квадрату напряжения.

215. Номинальный и десятисекундный токи плавкой вставки связаны соотношением

$$I_{\text{вн}} = \frac{I_{10}}{2,5},$$

которым и следует воспользоваться для решения задачи.

216. Защита от перегрузок требует более строгого согласования номинального тока плавкой вставки и допустимого по нагреву тока проводов линии, чем защита от коротких замыканий. Поэтому защиту от перегрузок осуществить труднее, чем защиту от коротких замыканий.

Если провод защищен от перегрузок, то он заведомо защищен от коротких замыканий. Обратное утверждение не имеет силы: провод, защищенный от коротких замыканий, не обязательно защищен от перегрузок.

217. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение задачи в консультации к первому ответу.

218. Электрической сетью называют часть энергетической системы, включающую линии электропередачи (ЛЭП) и трансформаторные подстанции (ТП). Назначение электрической сети — передача энергии от электростанций к потребителям. В потребителях электрическая энергия преобразуется в другие виды: механическую, тепловую, световую, химическую и т.д. энергию.

Если всю вырабатываемую в стране электроэнергию принять за 100%, то распределение ее по видам потребителей в процентном выражении выглядит примерно так:

- электропривод 62%;
- электрохимия 12%;
- электротермия 10%;
- освещение 9%;
- электротяга 5%;
- связь и телевидение 2%.

219. Номинальные токи предохранителей определяются в результате электрического расчета линии на основании данных о площади поперечного сечения проводов линии и характере потребителей.

220. Правильно. При равной длине и одинаковом материале проводов двухпроводной и трехпроводной линий масса одного провода пропорциональна площади его поперечного сечения.

Сечение каждого провода трехпроводной линии в 2 раза меньше сечения одного провода двухпроводной линии, следовательно, один провод трехпроводной линии весит $100/2 = 50$ кг.

Таким образом, трехпроводная линия весит $50 \cdot 3 = 150$ кг. Двухпроводная линия весит $100 \cdot 2 = 200$ кг. Масса трехпроводной линии составляет $150/200 = 3/4$ от масса двухпроводной линии. Применение трехфазного тока позволяет получить 25%-ную экономию цветного металла.

221. Правильно. Сети с напряжением до 1000 В применяются для распределения электрической энергии по отдельным потребителям. Это сети сравнительно небольшой протяженности (до нескольких километров длиной), в ко-

торых потери относительно невелики. Пониженное напряжение позволяет обеспечить безопасность обслуживающего персонала, уменьшить размеры и стоимость изолирующих деталей.

Высоковольтные сети с расчетным напряжением в десятки и сотни киловольт применяются для передачи энергии на дальние расстояния. При заданной мощности линии $P = UI$ с увеличением напряжения уменьшается ток и резко снижаются тепловые потери в линии, пропорциональные квадрату тока (закон Джоуля – Ленца).

222. На однолинейной схеме двухпроводной линии было бы нанесено только две черточки вблизи условного изображения источника питания. На рисунке изображена однолинейная схема четырехпроводной линии.

223. Из формул для подсчета площади поперечного сечения проводов линии электропередачи следует, что площадь сечения проводов зависит от напряжения, следовательно, и масса линии зависит от напряжения. При прочих равных условиях масса провода пропорциональна площади его поперечного сечения.

224. По условию задачи минимальный из токов, которые расплавляют вставку, равен 10 А. Токи, большие 10 А, заводом расплавят ее, и тем быстрее, чем больше ток.

225. Воспользуйтесь формулой $I_{\min} = \frac{1,5}{1,25} I_{\text{доп}}$.

226. Для простоты рассуждений пренебрежем сопротивлением изоляции провода. Тогда ток утечки распределится обратно пропорционально сопротивлениям тела человека и заземлителя:

$$I_{\text{чел}} = I_y \frac{R_3}{R_3 + R_{\text{чел}}} = 76 \frac{10}{10 + 2600} = \frac{38}{130} \text{ мА}.$$

227. Правильно. Многофазные системы (с числом фаз большим трех) применяются очень редко в специальных случаях.

228. Правильно:

$$\Delta U, \% = \frac{U_1 - U}{U} = \frac{26 - 25}{25} = 0,04 = 4\%.$$

229. По условию задачи напряжения на потребителях (фазные напряжения) одинаковы. Поэтому при соединении звездой линейное напряжение будет больше, чем при

соединении тех же потребителей треугольником. Масса линии обратно пропорциональна квадрату напряжения.

230. Вы ошиблись. Номинальный и десятисекундный токи плавкой вставки связаны соотношением $I_{\text{вн}} = \frac{I_{10}}{2,5}$, используя которое, находим $I_{\text{вн}} = \frac{25}{2,5} = 10 \text{ А}$.

231. Напряжение необходимо для того, чтобы создать ток, протекающий через организм человека. Непосредственное физиологическое воздействие на организм оказывает ток. При высокой электрической прочности кожных покровов даже повышенное напряжение не представляет опасности. Наоборот, при влажной коже и расширенных капиллярах напряжение всего в несколько десятков вольт смертельно опасно.

232. Если заземлить токоведущие детали электротехнических установок, то фазы генератора окажутся замкнутыми накоротко через землю, сработают плавкие предохранители и линия будет отключена от источников питания.

Заземляются только те части электротехнических установок, которые изолированы от токоведущих деталей. Такое заземление предохраняет человека от токов утечки, которые при нарушении изоляции нетоковедущих частей могли бы протекать через его тело. Кроме того, заземление привело бы к срабатыванию защиты и отключению линии, если бы изоляция нарушилась одновременно в двух или трех фазах.

233. Правильно. Воздушные сети применяются в сельской местности и для передачи электроэнергии на дальние расстояния. Кабельные сети применяются в условиях крупных городов и в некоторых других случаях, например под водой. Внутренние сети объектов по своей конструкции отличаются как от воздушных, так и от кабельных сетей.

234. Воспользуйтесь законом Ома. Учтите, что потеря напряжения возникает в двух проводах линии.

235. Нетрудно видеть, что в случае *б* масса линии будет меньше, а не больше, чем в случае *а*. При равенстве линейных напряжений в случаях *а* и *б* экономия в массе составила бы 25%. Но следует учесть, что по условию задачи потребители в обоих случаях находятся в одинаковых условиях, т.е. их мощности одинаковы и напряжения на потребителях одинаковы. Но тогда линейное напряжение в случае *б* будет в $\sqrt{3}$ раз больше, чем в случае *а*. При этом экономия в массе составит не 25%, а значительно большую величину.

236. Вы ошиблись. Посмотрите правильное решение в консультации к третьей строке ответов.

237. Воспользуйтесь законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}.$$

238. Заземление средней точки генераторов в трехпроводной сети недопустимо, так как оно не снижает, а повышает вероятность поражения человека электрическим током.

При отсутствии заземления средней точки через параллельно соединенные тело человека и сопротивление заземлителя электроустановки в случае аварийного режима протекает ток утечки, основная часть которого течет через заземлитель и небольшая — через тело человека.

При заземлении средней точки через параллельно соединенные тело человека и заземлитель протекает ток короткого замыкания на землю, который значительно больше тока утечки. Соответственно увеличивается и ток, протекающий через тело человека. Примерные расчеты посмотрите в консультации к первому ответу.

239. Стальные провода обладают высокой прочностью, однако их электропроводность значительно уступает электропроводности меди и алюминия.

Сопротивления провода длиной 1 м с поперечным сечением 1 мм² при температуре 20°C характеризуется следующими цифрами, Ом·мм²/м (в зависимости от материала провода):

Медь — 0,017;

Алюминий — 0,027;

Сталь — 0,220.

Отсюда очевидно, что при прочих равных условиях сопротивление алюминиевого провода более чем в 8 раз меньше стального, а сопротивление медного провода более чем в 1,5 раза меньше алюминиевого.

240. Если не учитывать реактивного сопротивления линии, то приведенных данных достаточно для определения абсолютного значения падения напряжения в линии. Оно равно

$$I \cdot 2R = 10 \cdot 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ В.}$$

Потерю напряжения на основании приведенных данных найти нельзя: необходимо знать еще угол ϕ сдвига по фазе между напряжением и током в нагрузке.

241. Правильно. Масса двухпроводной линии 200 кг. В четырехпроводной линии достигается экономия в массе 71%, следовательно, масса четырехпроводной линии составляет 29% от массы двухпроводной линии. Таким образом, масса четырехпроводной линии равна

$$200 \cdot \frac{29}{100} = 58 \text{ кг.}$$

242. Осветительная сеть должна быть защищена не только от коротких замыканий, но и от перегрузок. Если установить предохранитель, плавкая вставка которого имеет номинальный ток 25 А, то даже при двойной перегрузке сети ($12 \cdot 2 = 24$ А) предохранитель не сработает. Необходимо выбрать стандартный предохранитель с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим условию

$$I_{\text{вн}} \geq I_{\text{р.}}$$

243. Для расчета линии обычно задается действующее значение напряжения, которое определяется номинальными данными генератора или трансформатора.

244. Вы ошибаетесь. Если при прочих равных условиях изменить допустимую потерю напряжения в проводах линий, то изменится и расчетное сечение проводов.

245. Для того чтобы ампер-секундная характеристика пересекла ось времени, необходимо, чтобы плавкая вставка расплавлялась током, равным нулю. Это невозможно.

246. С целью экономии цветного материала надо выбрать провод наименьшего сечения при условии, что допустимый ток этого провода удовлетворяет соотношению

$$I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{вн}} .$$

247. Вы ошиблись. При параллельном соединении сопротивлений ток распределяется обратно пропорционально величинам этих сопротивлений:

$$I_{\text{чел}} = I_{\text{у}} \frac{R_{\text{из}}}{R_{\text{из}} + R_{\text{чел}}} = 76 \frac{5 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3} = 50 \text{ мА} .$$

248. Правильно. Сопротивление трубы подсчитывается по формуле

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \frac{\rho}{l} ,$$

где ρ — удельное сопротивление почвы; l — длина трубы.

Для суглинистой почвы удельное сопротивление $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Таким образом,

$$R_{\text{тр}} = 0,9 \frac{100}{2} = 45 \text{ Ом} .$$

Покупайте наши книги:

В офисе издательства «ЮРАЙТ»:

111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4,
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru, www.urait.ru

В логистическом центре «ЮРАЙТ»:

140053, Московская область, г. Котельники, мкр. Ковровый, д. 37,
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru, www.urait.ru

В интернет-магазине «ЮРАЙТ»: 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

Учебное издание

Данилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебное пособие для бакалавров

Формат 84×108^{1/32}.

Гарнитура «PetersburgС». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 35,33. Доп. тираж 1000 экз. Заказ №

ООО «ИД Юрайт»

111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru