

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**АИПОВ Р.С.**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ**

(конспект лекций, часть II Синхронные электрические машины,  
машины постоянного тока)

Уфа  
Башкирский ГАУ  
2013

УДК 621.3(07)

ББК 40.76 Я7

А 36

Конспект лекции предназначен для студентов по специальности 140106 Энергообеспечение предприятий. Может быть рекомендован студентам по специальности 110302 Электрификация и автоматизация сельского хозяйства, студентам электротехнических специальностей, изучающих электрические машины в рамках подготовки бакалавров по направлению «Теплотехника и теплоэнергетика, агроинженерия».

В книге рассмотрены: синхронные электрические машины; машины постоянного тока.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Опыт работы со студентами энергетического факультета Башкирского государственного аграрного университета показал, что наиболее трудными для понимания является дисциплины «Электрические машины», «Электрические машины и аппараты».

Поэтому основная задача автора заключалась в том, чтобы по возможности доступно и при умеренном объеме изложить материал по электромеханическому преобразованию энергии от физических основ до технических решений, режимов работы и эксплуатационных характеристических электрических машин и аппаратов.

Первая часть книги посвящена физическим основам электромеханического преобразования энергии, трансформаторам и асинхронным машинам.

В приложении приведены основные справочные данные по физике и электромеханике необходимые для понимания материала.

Вторая часть книги посвящена синхронным электрическим машинам и машинам постоянного тока. Каждая глава заканчивается вопросами для самопроверки по главе.

При написании конспекта лекции использовались учебники, кроме приведенных в работе, по электротехнике, электромеханике, электроприводу (Л.Р. Нейман, Л.А. Бессонов, Т.А. Татур, В.В. Попов, А.А. Булгаков, Н.Ф. Ильинский, М.Г. Чиликин, Ю.А. Сабинин, В.А. Елисеев), а также статьи и монографии по специальным электрическим машинам.

## ВВЕДЕНИЕ

Почти вся электроэнергия в мире вырабатывается синхронными электрическими машинами (турбо- и гидрогенераторами), установленными на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях. Самые крупные синхронные генераторы имеют мощность в одной единице до  $500 \div 1200$  МВт.

Синхронные генераторы сравнительно небольшой мощности – от десятков до несколько сотен киловатт – широко применяются в системах автономного электроснабжения (грузовой и легкой транспорт, дизель – генераторы, газотурбогенераторы).

Синхронные двигатели мощностью более 200 кВт успешно конкурируют с асинхронными в системах нерегулируемого электропривода при частотах вращения более 250 об/мин.

Машины постоянного тока используются главным образом в качестве двигателей с высокой перегрузочной способностью и широкими возможностями регулирования в электроприводе. Генераторы выпускаются в качестве источников автономного питания, например, для питания обмоток возбуждения синхронных генераторов.

Сфера применения электрических машин и диапазон мощностей неуклонно расширяются.

Научно – технический прогресс в электромашиностроении во многом определяет уровень развития других отраслей науки и техники.

# 1. СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## 1.1 Конструкция синхронных электрических машин (синхронных машин).

Синхронную машину можно получить, если к обмоткам статора подвести переменный ток, а к обмоткам ротора постоянной. Можно и наоборот, такие машины называются обращенными. Из-за сложности токоподвода обращенные машины применяются в меньшей степени.

Обмотка (в большинстве случаев – трехфазная), в которой индуцируется переменная ЭДС, называется обмоткой якоря; располагается она, на статоре. Статор синхронной машины по обмотке, практически не отличается от статора асинхронной машины. Скорость вращения электромагнитного поля, создаваемого обмотками якоря, как и у асинхронной машины равна:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

В синхронных машинах угловая скорость ротора равна синхронной угловой скорости поля  $\omega_2 = \omega_1$  или  $n_2 = n_1$ . В синхронных машинах ротор с обмоткой возбуждения, к которой подводится постоянный ток, называется индуктором.

В зависимости от исполнения синхронные машины имеют следующий вид (Рис. 1.1).

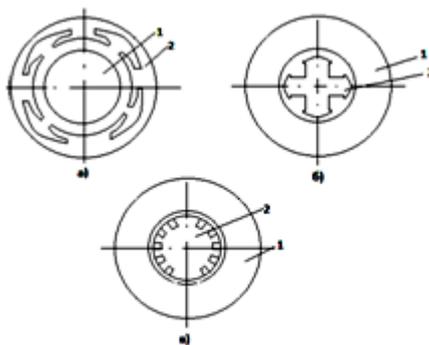


Рисунок 1.1 Исполнение синхронных машин а) обращенная синхронная машина, б) явнополюсная синхронная машина, в) неявнополюсная синхронная машина. 1 - статор, 2 - индуктор.

Неявнополюсные индукторы применяются в быстроходных машинах – турбогенераторах, частота вращения которых  $n_2=1500$  и  $3000$  об/мин, а явнополюсные – в гидрогенераторах с  $n_2 = 62,5 \div 250$  об/мин.

Синхронные машины работают в трех режимах: генераторном, двигательном и в режиме синхронного компенсатора.

Режим генератора наиболее распространенный. Без преувеличения можно сказать, что вся электрическая электроэнергия на земле вырабатывается синхронными генераторами. Синхронные генераторы – самые мощные электрические машины, созданные человеком. На тепловых и атомных электростанциях эксплуатируются турбогенераторы мощностью 1200 МВт на 3000 об/мин. и 1600 МВт на 1500 об/мин.

Турбогенераторы – неявнополюсные быстроходные электрические машины. Они имеют диаметр ротора 1,2 – 1,25 м. и длину активной части статора около 7 м. с горизонтальным расположением, в турбогенераторах достигнут наибольший КПД – 99 %.

Мощность турбогенераторов за последний 30 – 40 лет, практически в тех же габаритах увеличилась в 10 раз. Это одно из самых крупных научных достижений второй половиной XX в. Гидрогенераторы – тихоходные машины, как правило, с вертикальной осью вращения. Гидрогенераторы по габаритам значительно больше турбогенераторов. Конструктивные части гидрогенератора занимают большой объем. Опорные подшипники воспринимают массу ротора, гидравлической турбины и напора столба воды. (Рис. 1.2)

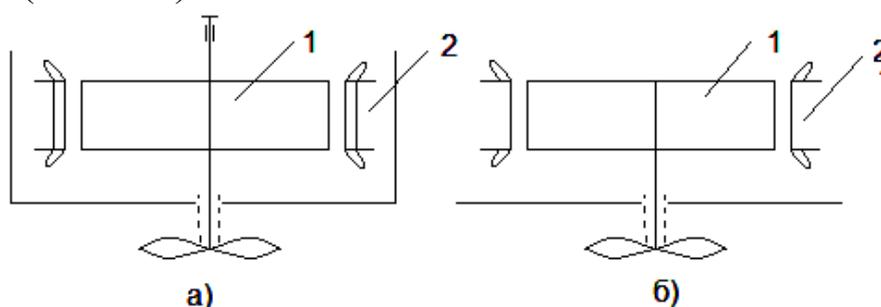


Рисунок 1.2 Варианты выполнения гидрогенераторов: а) с двумя подшипниковыми узлами, б) с одним подшипниковым узлом ротора.

1 - индуктор с турбиной, 2 - неподвижный статор

Гидрогенераторы – явнополюсные тихоходные электрические машины, диаметр ротора красноярского гидрогенератора мощностью 500 МВт равен 16,1 м. высота сердечника – 1,75 м. КПД – 98,2%. Масса 1650 т.

Синхронные генераторы для дизель-генераторных установках имеют мощность от сотен до десятков тысяч кВт. Выпуск автомобильных и тракторных генераторов мощностью от сотен Вт и нескольких кВт достигает миллионов штук в год.

В режиме двигателя синхронная машина используются в качестве привода двигателей мощных насосов, вентиляторов, воздуходувов. Придельная мощность синхронных двигатели несколько сотен мегаватт,  $p \geq 2$ .

Синхронные микродвигатели применяются в различных электроприводах. Выпускаются двигатели в которых для создания поля возбуждения применяются постоянные магниты.

Одним из основных достоинств синхронных машин является то, что они могут быть источниками реактивной мощности. Если асинхронная машина для работы потребляет из сети реактивную мощность, то синхронная машина в зависимости от степени возбуждения выдают в сеть или потребляют из сети реактивную мощность. Такие синхронные машины называются синхронными компенсаторами, они работают в режиме генератора реактивной мощности или потребителя реактивной мощность.

Конструкции синхронных компенсаторов и мощных синхронных двигателей принципиально не отличаются от неявнополюсных и явнополюсных синхронных генераторов. Синхронные машины благодаря их преимуществам перед асинхронными находят новые применение, а их выпуск и области применение с каждым годом расширяются.

## **1.2 Векторные диаграммы синхронного генератора при различной нагрузке.**

Индуктор явнополюсной синхронной машины имеет магнитную несимметричную, т.к. магнитное сопротивление потоку по поперечной оси  $q$ , т.е. по оси междуполюсного пространства, существенно больше магнитного сопротивления потоку по продольной оси  $d$ , по оси полюсов.

Поэтому одинаковая по величине намагничивающая сила якоря при её действии по оси  $d$  создаёт больший магнитный поток, чем при действии по оси  $q$ . Кроме того, любой индуктор синхронной машины имеет электрическую несимметрию, т.е. обмотки возбуждения расположены по продольной оси  $d$ , создают продольный поток возбуждения и сцепляет с продольным потоком реакции якоря.



ЭДС  $E_0$  индуцируется основным потоком  $\Phi_{o0}$  и отстает от него по фазе на  $\pi/2$ . Ток нагрузки (ток якоря) совпадает по фазе с ЭДС (если нагрузка активная).

Поток  $\dot{\Phi}_{яq}$  совпадает с током  $I_1$  по фазе. ЭДС  $E_я$  индуцируемый  $\dot{\Phi}_{яq}$  отстает от него по фазе на  $\pi/2$ .  $E_я = 4,44fw\dot{\Phi}_{яq}$ .  $E_я$  является э. д. с. самоиндукции, поэтому он может быть представляется в виде  $\dot{E}_я = -jX_яI_1$ , где  $X_я$  - индуктивное сопротивление обмотки якоря, обусловленное магнитным потоком якоря. Тогда

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_я$$

При индуктивной нагрузке векторная диаграмма имеет следующий вид (Рис. 1.4). Осевая линия потока якоря совпадает с осевой линией основного магнитного потока. Такой магнитный поток называется продольным и обозначается  $\dot{\Phi}_{яd}$ .

При индуктивной нагрузке поток  $\dot{\Phi}_{яd}$  направляет навстречу  $\Phi_{o0}$  и поэтому является размагничивающим. Индуктивная нагрузка уменьшает результирующий магнитный поток  $\dot{\Phi}$  и результирующую ЭДС  $E_1$

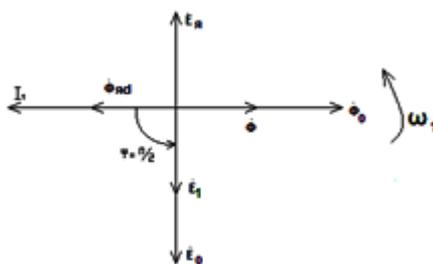


Рисунок 1.4 Векторная диаграмма магнитного потока и ЭДС явнополюсного синхронного генератора при индуктивной нагрузке.

При емкостной нагрузке ток  $I_1$  создает магнитный поток якоря совпадающий по направлению с основным магнитным потоком  $\Phi_{o0}$  и является продольным намагничивающим потоком  $\Phi_{яd}$  (Рис. 1.5).

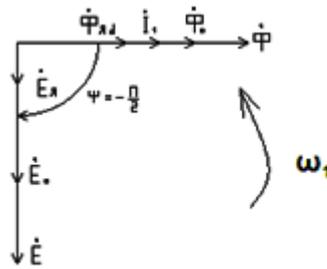


Рисунок 1.5 Векторная диаграмма магнитного потока и ЭДС явнополюсного синхронного генератора при емкостной нагрузке

Как видно из диаграммы результирующий поток  $\Phi$  и ЭДС  $E$  увеличивается за счет реакции якоря.

В общем случае, когда нагрузка имеет активную и реактивную составляющую тока, поток  $\dot{\Phi}_я = \dot{\Phi}_яq + \dot{\Phi}_яд$ . Если нагрузка активно – индуктивная, то реакция якоря размагничивающая, а если нагрузка активно-емкостная, то реакция якоря намагничивающая – подмагничивающая.

В неявнополюсных синхронных генераторах реакция якоря  $\dot{\Phi}_я$  характеризуется полным потоком, без разделения его по осям, так как в этих машинах магнитные сопротивления по продольным и поперечным осям одинаковы. Поэтому ЭДС якоря в неявнополюсных машинах  $E_я$  равна индуктивному падению напряжения в обмотке якоря, пропорциональная индуктивному сопротивлению реакции якоря  $X_я$ , то есть  $\dot{E}_я = -jI_1X_я$ .

Таким образом в обмотке неявнополюсного синхронного генератора вращающиеся потоки индуцируют ЭДС: основной поток  $\Phi_{о0}$  - ЭДС  $E_{о0}$ , поток якоря  $\Phi_я$  - ЭДС  $E_я$ . Кроме этих потоков существует поток рассеяния  $\Phi_{рас}$  создаваемый током якоря. Поток рассеяния индуцирует в обмотке статора ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{рас} = -jX_{рас}I_1$$

$X_{рас}$  – индуктивное сопротивление якоря, обусловленное потоком рассеяния.

Поток реакции якоря  $\Phi_я$  и поток рассеяния якоря  $\Phi_{рас}$  создаются одним током  $I_1$ , поэтому индуктивные сопротивления  $X_c$  можно рассматривать как  $X_я + X_{рас} = X_c$ .

$X_c$ - представляет собой синхронное сопротивление неявнополюсной машины. С учетом этого ЭДС реакции якоря  $E_{оя}$  и

ЭДС рассеяния  $E_{рас}$  следует рассматривать также как сумму  $\dot{E}_c = \dot{E}_я + \dot{E}_{рас}$ .

По второму закону Кирхгофа можно для фазы обмотки якоря записать  $\dot{E}_0 + \dot{E}_я + \dot{E}_{рас} = \dot{v} + R_я \dot{I}_1$  где  $\dot{v}$  – напряжение на нагрузке.  $R_я$  – активное сопротивление обмотки якоря, учитывая это получим:

$$\dot{v} = \dot{E}_0 - R_я \dot{I}_1 - j(X_я + X_{рас})\dot{I}_1 = E_0 - R_я \dot{I}_1 - jX_c \dot{I}_1,$$

Рассматриваемое уравнение является уравнением ЭДС синхронного генератора.  $R_я \ll X_c$ , поэтому падением напряжения  $R_я I$  обычно пренебрегают. Получается упрощенное уравнение ЭДС синхронного генератора

$$\dot{v} = \dot{E}_0 - jX_c \dot{I}_1.$$

Согласно этому уравнению можно построить векторную диаграмму синхронного генератора с неявновыраженными полюсами (Рис. 1.6).

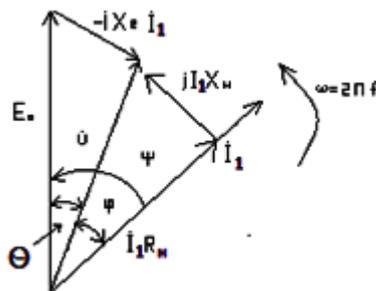


Рисунок 1.6 Векторная диаграмма ЭДС неявнополюсного синхронного генератора

Векторная диаграмма генератора строиться с целью определения изменения напряжения на его зажимах при изменении нагрузки. Для проектируемой машины диаграмма строиться по расчетным данным, а для выполненной – по результатам испытаний в режимах холостого хода и короткого замыкания.

### 1.3 Уравнения напряжений синхронного генератора.

Напряженные на зажимах генератора, является результатом взаимодействия следующих факторов:

- 1) Основной намагничивающей силы (НС) полюсов, создающей основной поток  $\Phi_{о0}$ ;
- 2) Продольной НС реакции якоря  $F_{яd}$ , пропорциональной реактивной составляющей нагрузочного тока,  $I_d = I_1 \sin\psi$ ;

3) Поперечной НС реакции якоря  $F_{яq}$ , пропорциональной активной составляющей тока нагрузки,  $I_q = I_1 \cos\psi$ .

4) ЭДС рассеяния пропорциональное току нагрузки,  $E_{рас} = X_{рас} I$

Сюда же следует отнести и падение напряжения на активном сопротивлении якоря,  $I_1 R_{я}$ , которое мало по сравнению с другими составляющими.

Каждую НС можно рассматривать, как существующую отдельно друг от друга. Каждая из них создает свой поток и ЭДС. Таким образом, имеем 4 потока и 4 создаваемые ими ЭДС:

- а) поток и ЭДС продольной реакции якоря –  $\Phi_{яd}$  и  $E_{яd}$ ;
- б) поток и ЭДС поперечной реакции якоря -  $\Phi_{яq}$  и  $E_{яq}$ ;
- в) основной поток и ЭДС –  $\Phi_0$  и  $E_{00}$ ;
- г) поток рассеяния и ЭДС рассеяния -  $\Phi_{\delta}$  и  $E_{рас}$ .

Геометрическая сумма перечисленных ЭДС определяет напряженные на зажимах генератора  $u$ .

С другой стороны, при разложении всех потоков, создаваемых током нагрузки  $I_1$  по продольной и поперечной осям, можно воспользоваться реактивностями синхронной машины по продольным и поперечным осям –  $X_d$  и  $X_q$ , называемым параметрами машины.

Исходя из сказанного, уравнения напряжений синхронного генератора имеет вид:

$$\dot{u} = \dot{E}_{00} + \dot{E}_{яd} + \dot{E}_{яq} + \dot{E}_{рас} - R_{я} \dot{I}_1$$

Выражая ЭДС через параметры, как  $\dot{E}_{яd} = -jX_d \dot{I}_d$ ;  $\dot{E}_{яq} = -jX_q \dot{I}_q$ ;

$\dot{E}_{рас} = -jX_{рас} \dot{I}_1$  получим

$$\dot{u} = E_{00} - jX_d \dot{I}_d - jX_q \dot{I}_q - jX_{рас} \dot{I}_1 - R_{я} \dot{I}_1$$

Уравнение читается следующим образом: напряжения на зажимах генератора равно ЭДС  $E_{00}$  индуктируемой потоком возбуждения  $\Phi_{00}$ , минус падения напряжений на индуктивных сопротивлениях реакции якоря  $X_d$  и  $X_q$ , рассеяния  $X_{рас}$  и на активном сопротивлении  $R_{я}$ .

## 1.4 Характеристики синхронного генератора работающего на автономную нагрузку.

Основными характеристиками синхронного генератора работающего на автономную нагрузку, является 1) характеристика холостого хода (xxx); 2) внешняя; 3) регулировочная и 4) характеристика короткого замыкания.

Характеристика холостого хода это зависимость ЭДС от тока возбуждения ( $I_f$ ). ( $E = f(I_f)$ , при  $I_a=0$ ;  $n=\text{const}$ ) имеет начальную прямолинейную часть OA, когда магнитная цепь ненасыщенна (Рис. 1.7). Машина начинает насыщаться вблизи номинального значения ЭДС. По характеристике холостого хода можно определить взаимную индуктивность между обмотками возбуждения и якоря. Взаимная индуктивность может быть определена как отношение ЭДС к току возбуждения.

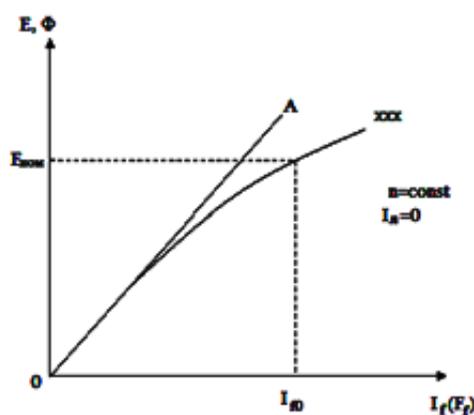


Рисунок 1.7 Характеристика холостого хода синхронного генератора работающего на автономную нагрузку.

Опытным путём характеристика холостого хода снимают при постоянной номинальной частоте вращения, при изменении  $I_f$  и разомкнутой обмотке якоря ( $I_a = 0$ ).

При исследовании характеристики холостого хода сначала строят восходящую линию, а затем — при уменьшении  $I_f$  — нисходящую. При расчётах используется средняя линия. Гистерезис имеет место из-за того, что ротор не перемагничивается, по стали ротора замыкается постоянный магнитный поток возбуждения.

Внешней характеристикой синхронного генератора называется зависимость напряжения на выходе генератора от тока якоря:

$U = f(I_a)$  при  $n = const$ ,  $\cos\varphi = const$ , снятые при неизменном токе возбуждения  $I_f = const$ . Ниже на рис. 1.8 приведены внешние характеристики синхронного генератора при чисто активной  $R$ , индуктивной  $L$ , и ёмкостной  $C$  нагрузках.

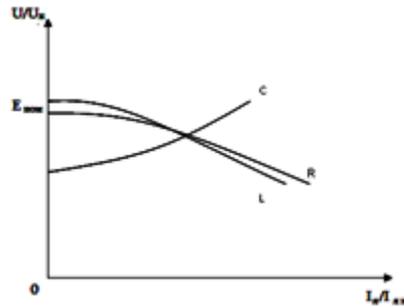


Рисунок 1.8 Внешняя характеристика синхронного генератора при различных нагрузках (R,L,C)

При активной нагрузке  $R$ , с увеличением тока якоря  $I_a$  (нагрузки) напряжение на выходе генератора имеет падающий характер из – за падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря  $\underline{Z}_a = R_a + jX_a$  и влияния поперечной реакции якоря. При индуктивной нагрузке за счёт более сильного размагничивающего действия продольной реакции якоря характеристика идёт еще ниже, чем при  $R$ . При ёмкостной нагрузке реакция якоря подмагничивающая, поэтому при росте нагрузки растёт напряжение на выходе синхронного генератора.

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора  $\Delta U_{ном}$  называется изменением напряжения при изменении тока нагрузки от нуля до номинального при неизменном токе возбуждения (Рис. 1.9).

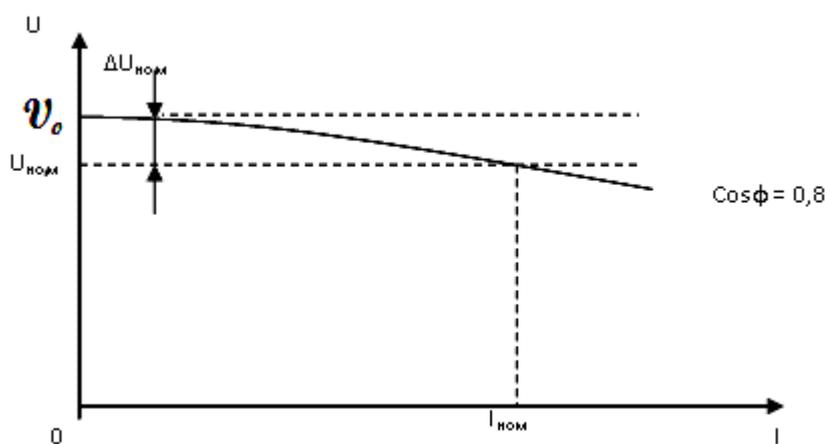


Рисунок 1.9 Номинальное изменение напряжения синхронного генератора.

$$\Delta U_{\text{НОМ}} \% = \frac{U_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100\%.$$

Как правило генераторы работают при отстающем токе с  $\cos \varphi = 0,8$ .  $\Delta U\%$  обычно равно 20 – 30 %  $U_{\text{НОМ}}$ ,  $\Delta U\%$ , тем больше, чем больше  $X_d$ . ГОСТ не лимитирует значение  $\Delta U_{\text{НОМ}}$ .

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения от тока якоря  $I_f = f(I_a)$  при постоянном напряжении, постоянной частоте вращения и неизменном  $\cos \varphi$  нагрузки (Рис.1.10). Регулировочные характеристики показывают, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным.

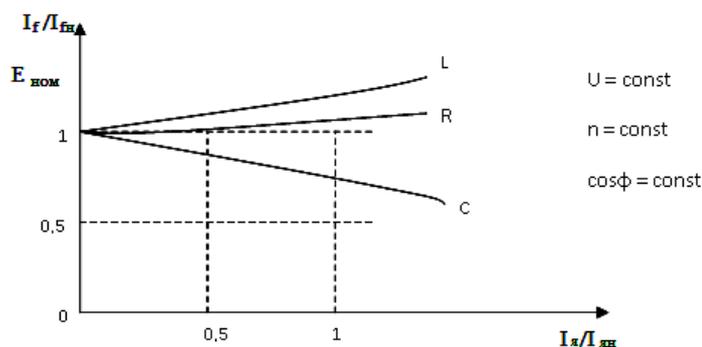


Рисунок 1.10 Регулировочная характеристика синхронного генератора

Регулировочные характеристики могут быть построены, если известны внешние характеристики. При увеличении нагрузки при

индуктивной нагрузке напряжение уменьшается. Чтобы напряжение оставалось неизменным, надо увеличить ток возбуждения. При емкостной нагрузке при увеличении тока в якоре машины напряжение на выводах генератора растёт. Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения.

Так же, как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны. При нагрузках, близких к номинальному значению, из-за насыщения, регулировочные характеристики нелинейны.

Одной из важных характеристик синхронных машин являются характеристики короткого замыкания – зависимость тока якоря от тока возбуждения  $I_a = f(I_f)$  при коротком замыкании на выводах якоря и при номинальной частоте вращения ротора ( $n = n_{ном}$ ).

Характеристики короткозамкнутого синхронного генератора приведены на рис. 1.11.

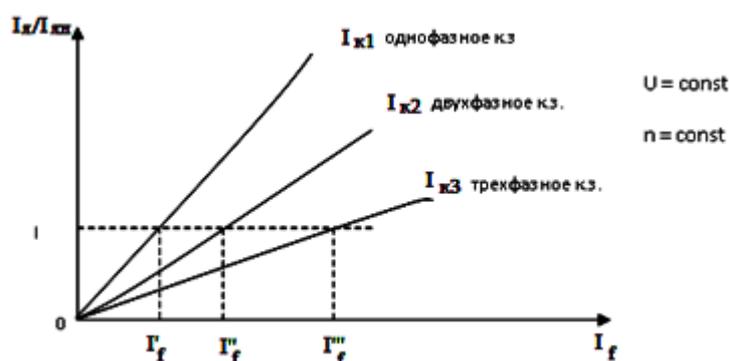


Рисунок 1.11 Характеристики короткого замыкания синхронного генератора

Характеристики носят прямолинейный характер. Последнее обстоятельство объясняется тем, что при коротком замыкании сопротивление якоря является практически индуктивным, если пренебречь малым активным сопротивлением генератора. Созданная этим током продольная размагничивающая реакция якоря в значительной степени ослабляет действие мдс возбуждения (полюсов), вследствие чего магнитная система генератора ненасыщенна. В ненасыщенной машине ЭДС якоря пропорциональна току возбуждения. Полагая, что индуктивное сопротивление  $X_d$  машины постоянно, получим прямопропорциональную зависимость между током якоря и током возбуждения.

При одной и той же величине тока короткого замыкания якоря, одно - , двух - , трёхфазного короткого замыкания, ток возбуждения увеличивается с увеличением числа фаз, участвующих в замыкании. Это объясняется различной величиной продольной размагничивающей реакции якоря. С увеличением числа фаз, участвующих в замыкании, за счёт увеличения числа витков увеличивается действие продольно – размагничивающей реакции якоря, и для обеспечения одного и того же значения тока якоря необходима большая мдс, следовательно больший ток возбуждения.

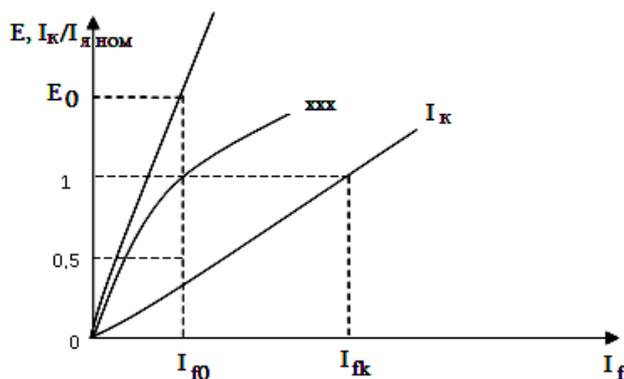


Рисунок 1.12 Спряmlенная характеристика  $xx$  и характеристика короткого замыкания синхронного генератора

Зависимость тока короткого замыкания (к.з.) якоря ( $I_{я}$ ) снимается при закороченной амперметрами обмотке якоря, при постепенном повышении тока возбуждения от нуля до значения  $I_{fk}$ , примерно равного номинальному значению. Эта зависимость линейная, т.к. генератор не насыщен (работает при размагничивающем действии реакции якоря). Индуктивный характер тока при к.з. определяется индуктивным сопротивлением обмотки якоря, которое значительно больше активного сопротивления обмотки (в относительных единицах  $R_{я} = 0,01 \div 0,001$ , а  $x_d = 1 \div 2,5$ ).

Ток короткого замыкания может быть определён как:

$$I_{fk} = \frac{E_0}{\sqrt{R_{я}^2 + x_d^2}},$$

где  $E_0$  - ЭДС, соответствующая току возбуждения  $I_{f0}$ , которая определяется по спряmlенной характеристике холостого хода (Рис. 1.12).

Пренебрегая активным сопротивлением  $I_{fk} \cong \frac{E_0}{x_d}$ .

Таким образом по характеристике холостого хода и характеристике короткого замыкания можно определить  $x_d$ .

Отношение тока возбуждения  $I_{f0}$  при котором  $E_0 = U_{ном}$  к току возбуждения при котором  $I_{як} = I_{ян}$  называется отношением короткого замыкания (окз).

$$f_{к.ном} = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} \text{ при } E_0 = U_{ном}.$$

Отношение короткого замыкания (окз) для ненасыщенной явнополюсной машины:

$$окз = \frac{U_{ном}}{x_d I_{ном}} \equiv \frac{1}{x_d}.$$

Отношение короткого замыкания, как и  $x_d$  определяет перегрузочную способность синхронной машины. Чем больше отношение короткого замыкания, тем больше предельная нагрузка генератора.

У турбогенераторов отношение короткого замыкания равна  $0,4 \div 1,0$ , а у гидрогенераторов  $0,8 \div 1,8$ .

Нагрузочная характеристика – это зависимость напряжения на генераторе от тока возбуждения  $U = f(I_f)$  при постоянном токе якоря,  $\cos\phi$  нагрузки и частоте вращения (Рис. 1.13). При изменении напряжения ток в нагрузке поддерживается путём регулирования сопротивления нагрузки.

Нагрузочные характеристики снимаются только при индуктивной нагрузке. Поэтому зависимость  $U = f(I_f)$  при  $\cos\phi = const$  называют индукционной нагрузочной характеристикой.

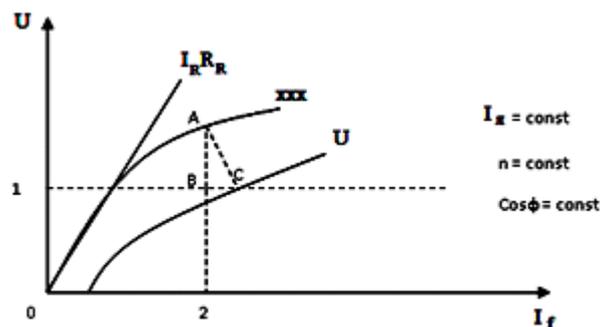


Рисунок 1.13 Нагрузочная характеристика синхронного генератора

Индукционная нагрузочная характеристика является вспомогательной характеристикой и используется для определения индуктивного сопротивления рассеяния. Для этого необходимо иметь характеристику холостого хода и индукционную нагрузочную характеристику, снятые опытным путём (Рис. 1.14).

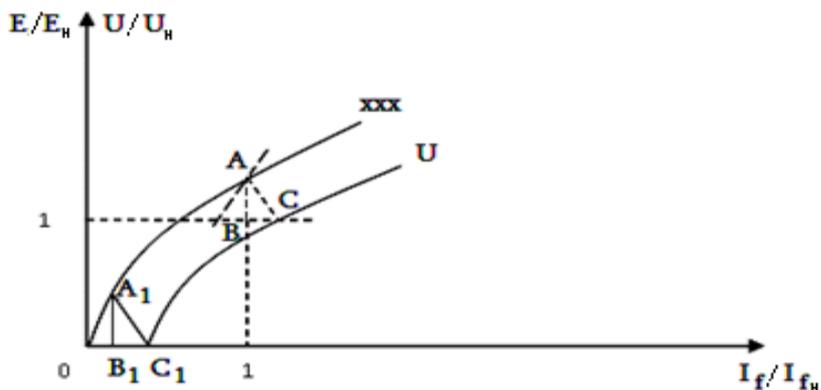


Рисунок 1.14 Характеристика холостого хода и индукционная нагрузочная характеристика синхронного генератора

Имея эти характеристики можно построить реактивный треугольник ABC. Реактивный треугольник показывает, что уменьшение напряжения при снятии нагрузочной характеристики происходит вследствие падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния (катет AB) и размагничивающего действия реакции якоря (катет BC).

### 1.5 Потери и КПД синхронных машин.

Преобразование энергии в синхронной машине связано с потерями энергии. Их можно разделить на основные и добавочные.

Основные потери в синхронной машине слагаются из электрических потерь в обмотке якоря, потерь на возбуждение, магнитных потерь и механических потерь.

Электрические потери в обмотке якоря  $P_{\sigma 1} = m_1 R_1 I_1^2$ , где  $R_1$  - активное сопротивление одной фазы обмотки якоря.

Потери на возбуждение:

а) при возбуждении от отдельного возбуждательного устройства  $P_g = I_g^2 R_g + \Delta \vartheta_m I_B$ , где  $R_g$  - активное сопротивление обмотки возбуждения;  $\Delta \vartheta_m = 2B$  - падение напряжения в щеточном контакте щеток;

б) при возбуждении от генератора постоянного тока (возбудителя), сочлененного с валом синхронной машины,  $P_g = (I_g^2 R_g + \Delta \vartheta_m I_B) / \eta_g$ , где  $\eta_g = 0,8 \div 0,85$  - КПД возбудителя.

Магнитные потери синхронной машины происходят в сердечнике якоря, который подвержен перемагничиванию вращающимся магнитным полем. Эти потери состоят из потерь на гистерезис  $P_2$  и потерь на вихревые токи  $P_{в.т.}$

$$P_M = P_2 + P_{в.т.}$$

Механические потери, равные сумме потерь на трение в подшипниках и потерь на вентиляцию (при самовентиляции машины).

$$P_{мех} \approx 3,68p \left(\frac{\vartheta_2}{40}\right)^3 \sqrt{10^3 l_1}, \quad \text{где} \quad \vartheta_2 = \pi(D_1 - 2\delta) n_1 / 60$$

— окружная скорость по поверхности полюсных наконечников ( $D_1$  - диаметр якоря со стороны индуктора,  $\delta$  - воздушный зазор);  $l_1$  - конструктивная длина сердечника якоря.

Добавочные потери в синхронных машинах  $P_{доб}$  при нагрузке определяют в процентах от подводимой мощности генераторов возбуждения. Для синхронных машин мощностью до 1000 кВт добавочные потери при нагрузке принимают равными 0,5%, а для машин мощностью более 1000 кВт - 0,25-0,4%. Суммарные потери в синхронной машине

$$\sum P = P_{э1} + P_g + P_M + P_{мех} + P_{доб}$$

Коэффициент полезного действия для синхронного генератора

$$\eta_g = 1 - \sum P / (P_{ном} + \sum P),$$

где  $P_{ном} = m_1 \vartheta_{1ном} \cdot I_{1ном} \cos \varphi_1$  - активная мощность, отбираемая от генератора при его номинальной нагрузке;

для синхронного двигателя  $\eta_d = 1 - \sum P / P_{1ном}$

Здесь  $\vartheta_{1ном}$  и  $I_{1ном}$  - фазные значения напряжения и тока якоря.

КПД синхронной машины зависят от величины нагрузки ( $\beta$ ) и от его характера ( $\cos \varphi_1$ ). График этой зависимости аналогичен трансформатору. КПД синхронных машин мощностью до 100 кВт составляет 80-90%, у более мощных машин КПД достигает 92-99%. Более высокие значения КПД относятся к турбо- и гидрогенераторам мощностью десятки и даже сотни тысяч кВт.

## 1.6 Работа трехфазного синхронного генератора параллельно с сетью (особенности работы генераторов в электрической системе).

85% электрической энергии в стране вырабатывается турбогенераторами (ТЭС), 15% гидрогенераторами (ГЭС).

Несколько % турбогенераторами атомных электрических станций (АЭС)

Все генераторы включаются параллельно и все потребители включены параллельно и представляют собой в сумме активно – индуктивные сопротивления, включенные в отдельные узлы электрической системы. Частота напряжения генераторов:  $f_1 = f_2 = f_3 \dots = f_n$ ;  $\omega_1 = \omega_2 = \dots \omega = 2\pi f_n$ .

$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p_1}$ ;  $\Omega_2 = \frac{\omega_2}{p_2}$ ;  $\Omega_n = \frac{\omega_n}{p_n}$  – реальные угловые скорости вращения индукторов синхронных генераторов обратно пропорциональны числу пар полюсов ( $p$ ) этих генераторов. При этом говорят что параллельно включенные генераторы работают синхронно друг с другом или находятся в синхронизме, а включение их на параллельную работу называется синхронизацией. Объединение генераторов и потребителей в общую электрическую систему значительно выгоднее, чем выделение отдельных генераторов на питание автономной группы потребителей. При достаточно большой мощности электрической системы по сравнению с мощностью отдельного синхронного генератора рассматриваемую систему можно считать бесконечно большой. Это означает, что при изменении режима работы синхронного генератора включенного в систему на ее выводах всегда  $f_c = const$ ,  $v_c = const$ . Наоборот при изменении в системе  $v_c$  и  $f_c$  влияние данного генератора можно не учитывать, а изменение режима его работы оценивают по заданной величине изменения  $v_c$  и  $f_c$ . Одной из основной технической задачей является изучение работы отдельного синхронного генератора работающего параллельно с электрической системой (сетью). Рассмотрим условия включения отдельного синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

## 1.7 Включение на параллельную работу синхронных генераторов.

Электрическую энергию практически нельзя накапливать. Нагрузка в энергосистеме изменяется в течение суток, недели и года.

Поэтому есть генераторы, покрывающие постоянную нагрузку, а другие включаются для покрытия пиков нагрузки. Постоянную нагрузку несут атомные электростанции, а турбогенераторы тепловых электростанции и гидрогенераторы на гидроэлектростанции в течение года могут включаться и отключаться от сети десятки и сотни раз в год.

Процесс пуска и синхронизации синхронных генераторов снижают его надежность больше, чем длительная работа. Процесс пуска длится несколько десятков минут.

Процесс включения генератора на параллельную работу с сетью - синхронизация машины – может быть точной и грубой. При точной синхронизации необходимо соблюдать следующее условие:

1. Частота напряжения сети и частота напряжения генератора должны быть одинаковыми;
2. Напряжение генератора и сети совпадают по фазе и имеют одинаковые амплитуды;
3. Порядок следования фаз напряжения в сети и генератора должны совпадать.

При соблюдении этих условий генераторы подключаются в сеть практически без бросков токов.

Равенство напряжений достигается путем регулирования тока возбуждения ( $I_f$ ) синхронного генератора, а равенство частот ( $f$ ) – путем регулирования частоты ( $n$ ) вращения индуктора генератора. На станции частота вращения индуктора изменяется за счет изменения скорости вращения паровой или гидравлической турбины или за счет изменения частоты вращения приводного двигателя.

При этих условиях в контуре сеть – машина сумма ЭДС равна нулю (Рис. 1.15).



Рисунок 1.15 Упрощенная электрическая схема системы синхронный генератор – сеть.  $E_0$ - ЭДС генератора;  $E_c$  – ЭДС сети.

Говорят, что при синхронизации ЭДС находятся в противофазе, имея в виду, что они уравнивают друг друга.

Порядок следования фаз, равенство частот и напряжений сети ( $\vartheta_c$ ) и генератора ( $E_0$ ) и фазовый сдвиг между ними определяются синхроскопом (СН).

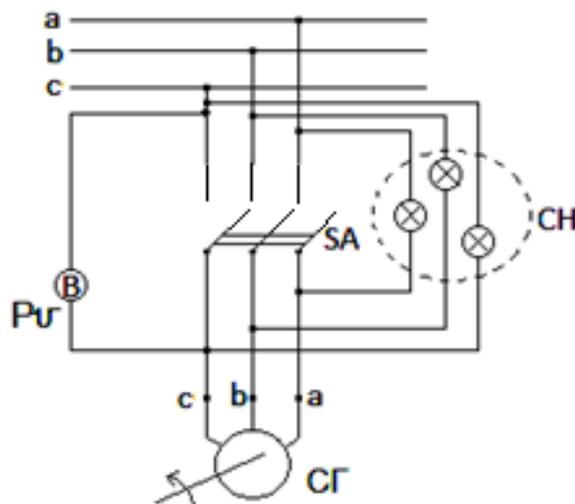


Рисунок 1.16 Включение лампового синхроскопа в сеть для проверки выполнения условий точной синхронизации синхронного генератора

При правильной чередовании фаз сети и генератора лампы синхроскопа гаснут одновременно (Рис. 1.16). Если чередование фаз не соблюдается, на лампах имеет место бегающий огонь, когда лампы попеременно зажигается и гаснут. Равенство напряжений контролируется вольтметром ( $P\vartheta$ ), о расхождении можно судить по яркости горения ламп. Схема с лампами при включении на параллельную работу применяются в учебных лабораториях, на электрических станциях используются специальные приборы.

На электростанциях широко применяются способ грубой синхронизации или самосинхронизации синхронного генератора. Таким способом включается синхронный генератор мощностью до 500 МВт. При этом способе сокращается время, необходимое для подключения генератора к сети, а это важно для обеспечения надежной и экономичной работы электросистемы.

Метод точной синхронизации обычно применяется при первом включении генератора на параллельную работу с сетью, так как длительность включения несколько десятков минут.

При аварийных ситуациях, когда генератор выведен защитной из параллельной работы, применение способа точной синхронизации затруднено вследствие значительных колебаний напряжения и частоты сети. В таких случаях применяют метод грубой синхронизации (самосинхронизации). Обмотку возбуждения генератора замыкают на активное сопротивление в 10 – 12 раз большее сопротивления обмотки возбуждения. Частота вращения индуктора доводится до примерно синхронной (частота вращения может отличаться от синхронного не более, чем на 2 – 5%) а затем генератор подключается к сети при быстром вслед за этим включение возбуждения генератора. После этого синхронный генератор сам втягивается в синхронизм под действием синхронизирующего момента. Недостаток метода большие броски тока, вызывающие значительные механические усилия в обмотках. Важное достоинство быстрота, оперативность.

При грубой синхронизации в обмотке возбуждения индуктора возможно появления ЭДС, индуцированный быстроменяющимся потоком якоря, которая может представлять серьезную опасность для витковой и корпусной изоляции обмотки. При замыкание обмотки возбуждения генератора на дополнительное сопротивление эта ЭДС создает ток, который, вызывая падение напряжения в витках обмотки индуктора, уменьшает межвитковое напряжения, а его индуктивная составляющая уменьшает индуцируемую ЭДС.

### **1.8 Угловая характеристика. Синхронизирующая мощность.**

После подключения генератора в сеть при соблюдении всех условий синхронизации его ЭДС  $E_0$  равна по значению и противоположна по фазе напряжению сети  $\vartheta_c$ , поэтому ток в цепи генератора  $I_1 = 0$ , то есть генератор работает без нагрузки. Механическая мощность  $P_0$  приводного двигателя генератора в этом случае полностью затрачивается на покрытие потерь холостого хода:

$$P_0 = P_{\text{мех}} + P_m + P_g$$

Отсутствие тока в обмотке статора синхронного генератора ( $I_1 = 0$ ) приводит к тому, что обмотка статора не создает вращающегося магнитного поля и в генераторе действует лишь магнитное поле возбуждения, вращающееся с индуктором с угловой скоростью  $\Omega_1$ , но не создающее электромагнитного момента.

Если же увеличить вращающий момент приводного двигателя  $M_1$ , то ротор машины, получив некоторое ускорение, сместится



где  $X_c$  - индуктивное синхронное сопротивление генератора равное  $x_d$  в явнополюсной машине.

Подставляя значение  $\cos \psi$  в выражение для  $P_{эм}$ , получаем:

$$P_{эм} = mU \frac{E_0}{x_c} \sin \theta \quad (1)$$

Соответственно электромагнитный момент:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_c} = \frac{mUE_0}{\omega_c x_c} \sin \theta,$$

где  $\theta$  - угол, на который продольная ось ротора смещена относительно продольной оси результирующего поля машины.

Электромагнитная мощность и электромагнитный момент зависят от  $U$ ,  $E_0$ ,  $x_c$  и угла  $\theta$ . Из векторной диаграммы (Рис. 1.17) видно, что угол  $\theta$  – это угол между  $\vec{E}_0$  и  $\vec{U}$ , а также между  $F_f$  и результирующей мдс  $F_p$  или угол между осью полюса и максимумом результирующего потока. Временному сдвигу на векторной диаграмме соответствует пространственный сдвиг между осью результирующего поля машины и с осью полюсов. Угол  $\theta$  определяет активную мощность машины и называется углом нагрузки. По (1) может быть построена угловая характеристика  $P_{эм}=f(\theta)$  (Рис. 1.18):

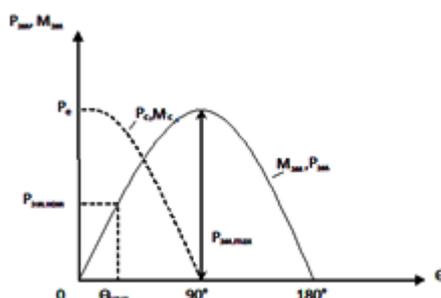


Рисунок 1.18 Угловая характеристика неявнополюсной синхронной машины

Из угловой характеристики следует, что максимум электромагнитной мощности имеет место при  $\theta = 90^\circ$ :

$$P_{эм.маx} = mU \frac{E_0}{x_c};$$

и соответственно максимальный электромагнитный момент:

$$M_{эм.маx} = \frac{mU E_0}{\omega_c x_c};$$

Максимальная электромагнитная мощность  $P_{эм.мах}$  определяет предел статической устойчивости машины, т.е. её способность оставаться в синхронизме.

Синхронный генератор, включенный на параллельную работу, обладает синхронизирующей способностью. Физический смысл синхронизирующей способности синхронных генераторов состоит в следующем. В процессе работы синхронного генератора в нем действуют два вращающихся магнитных поля: поле статора и поле ротора. Оба поля вращаются синхронно и создают в машине результирующее вращающееся магнитное поле. Так как обмотки статоров всех генераторов, включенных на параллельную работу, электрически связаны между собой, то также «связанными» оказываются и результирующие магнитные поля всех генераторов, которые вращаются с синхронной частотой вращения  $\omega_c$ .

Результирующее магнитное поле машины замыкается через сердечник ротора. Поэтому электрическая связь между обмотками статора параллельно работающих машин в конечном итоге переходит в магнитную связь роторов этих машин, аналогично эластичной механической связи, которая позволяет роторам смещаться относительно друг друга в пределах  $\theta < \theta_{кр}$ . Лишь при смещении ротора какого либо из параллельно работающих генераторов на угол  $\theta$ , выходящей за указанные пределы, связь ротора этой машины с роторами других машин нарушается и машина выходит из синхронизма.

Пояснение физических процессов происходящих при этом в синхронной машине дает рис. 1.19

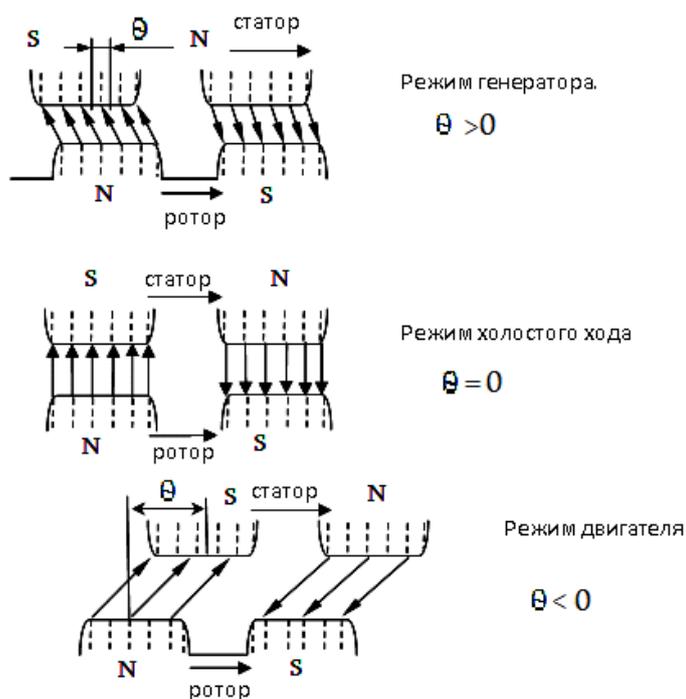


Рисунок 1.9 Взаимодействие статора и ротора синхронной машины

На угловой характеристике от угла  $\theta$ , равного нулю, до  $\theta=90^\circ$  расположена устойчивая часть характеристики, а в пределах угла от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  - неустойчивая часть характеристики.

Работа синхронной машины устойчива, если положительному (отрицательному) приращению угла  $\theta$  соответствует положительное (отрицательное) приращение  $P_{эм}$ , т.е.  $\frac{\Delta P_{эм}}{\Delta \theta} > 0$ .

Для количественной оценки синхронизирующей способности синхронной машины вводится понятие удельной синхронизирующей мощности. Удельная синхронизирующая мощность, - первая производная  $P_{эм}$  по углу  $\theta$  (Вт/град):

$$P_c = \frac{dP_{эм}}{d\theta} = mU \frac{E_0}{x_c} \cos \theta; \quad M_c = \frac{dM}{d\theta} = \frac{m\vartheta E_0}{\omega_c x_c} \cos \theta$$

Синхронизирующая мощность удерживает машину в синхронизме. Она обеспечивает упругую связь машины с сетью. Синхронизирующая мощность максимальна, когда  $P_{эм} = 0$ . Когда машина находится на пределе статической устойчивости, т.е. электромагнитная мощность равна своему максимальному значению,  $P_c = 0$ . Если запас синхронизирующей мощности равен 0, машина выпадает из синхронизма  $\omega_p \neq \omega_c$ , наступает асинхронный режим. В

асинхронном режиме у синхронного генератора должно быть снято возбуждение и этот режим работы для синхронной машины допускается кратковременно.

Номинальная нагрузка синхронного генератора обычно рассчитывается при угле  $\theta_{ном} \approx 20-30^\circ$ , поэтому машина может работать кратковременно при 1,5 – 2 кратном увеличении нагрузки, не выпадая из синхронизма. Отношение  $\frac{P_{эм.мах}}{P_{эм.ном}}$  называется статической перегружаемостью синхронной машины. Статическая перегружаемость:

$$m_n = \frac{P_{эм.мах}}{P_{эм.ном}} = \frac{mU_{ном} \frac{E_0}{x_d}}{mU_{ном} I_{ном} \cos \varphi_{ном}} = ОКЗ \frac{I_{fном}}{I_{f0} \cos \varphi_{ном}} \quad (2),$$

где  $\frac{E_0}{x_d} = I_{к.ном}$ . Выражение (2) получено при условии, что сопротивление обмотки якоря равно нулю и не учитывается насыщение.

Статическая перегружаемость турбогенераторов мощностью до 300 МВт должно быть не меньше 1.7, а для турбогенераторов мощностью 500÷1200 МВт – не менее 1.6. Статическая перегружаемость гидрогенераторов – не ниже 1.7.

Статическая перегружаемость тем больше, чем больше ОКЗ, т.е. чем меньше  $x_d$  или чем больше воздушный зазор.

Чтобы регулировать активную мощность синхронного генератора при параллельной работе его с сетью, необходимо изменять момент на его валу.

### 1.9 Регулирование реактивной мощности. $\vartheta$ - образные характеристики синхронного генератора.

Регулирование реактивной мощности в энергосистемах имеет такое же важное значение, как и активной мощности.

Поле в синхронной машине, работающей параллельно с сетью, создаётся обмоткой возбуждения и реактивными токами, протекающими в обмотке якоря. Результирующее поле, как это видно из векторной диаграммы, определяется МДС обмотки якоря и обмотки возбуждения (Рис. 1.20).

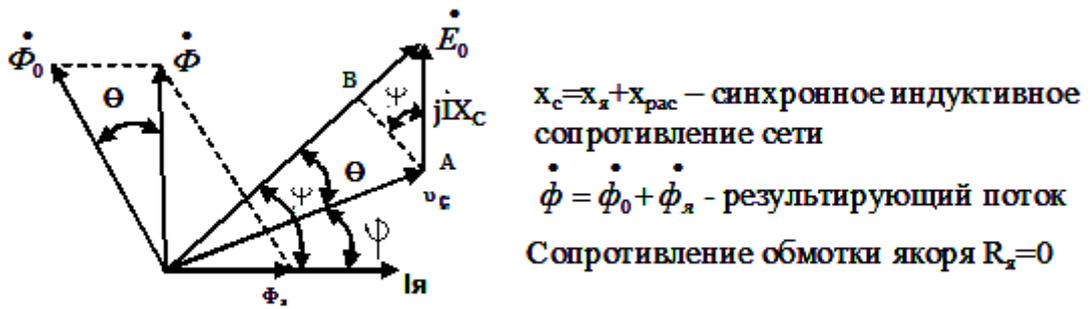


Рисунок 1.20 Векторная диаграмма синхронной машины

При изменении тока в обмотке возбуждения изменяется  $\dot{E}_0$  что приводит к изменению реактивного тока, замыкающего в контуре сеть – машина.

При увеличении тока в обмотке возбуждения (перевозбуждении машины) вектор  $\dot{U}_c$  не будет уравнивать  $\dot{E}_0$  и появится «избыточная» ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{U}_c + \dot{E}_0$  (Рис. 1.21а), которая вызовет появление реактивного тока  $I_p = -j \frac{\Delta \dot{E}}{x_c}$ , где  $I_p$  – реактивный ток отстающий от  $\Delta \dot{E}$  и опережающего напряжения  $U_c$ .

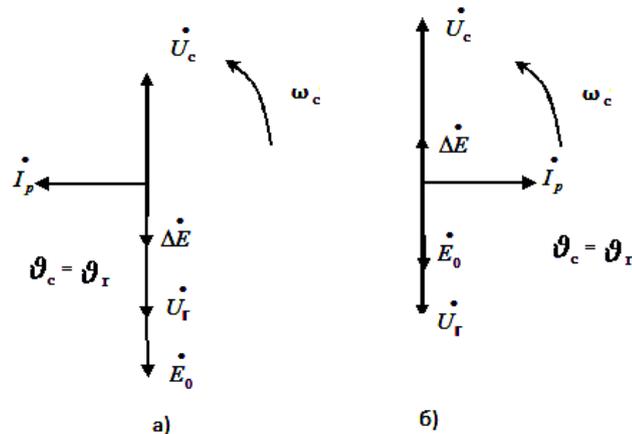


Рисунок 1.21 Векторная диаграмма ЭДС напряжения сети и тока якоря синхронного генератора: а) перевозбужденная машина; б) недовозбужденная машина

По отношению к напряжению сети  $U_c$ ,  $I_p$  – опережающий ток. Синхронная машина отдаёт реактивную мощность в сеть.

При уменьшении тока возбуждения (недовозбужденная машина)  $\dot{U}_c > \dot{E}_0$  (Рис. 1.21б), реактивный ток  $I_p$  отстаёт от напряжения сети.

Недовозбуждённая синхронная машина по отношению к сети является индуктивностью и потребляет из сети реактивную мощность.

В перевозбуждённом синхронном генераторе работающем параллельно с сетью, реакция якоря размагничивающая. Реактивные токи протекающие в обмотках якоря, размагничивают машину и напряжение  $-\dot{U}_r = \dot{U}_c$ . При недовозбуждении реакция якоря – подмагничивающая, реактивные токи, протекающие в обмотках якоря, подмагничивают машину и напряжение на генераторе по модулю становится равным напряжению сети.

Если при всех изменениях тока возбуждения вращающий момент приводного двигателя остается неизменным, то также неизменным остается активная мощность генератора:

$$P_1 = m_1 \vartheta_c I_{\text{я}} \cos \varphi_1 = \text{const}$$

Из этого выражения следует, что при  $\vartheta_c = \text{const}$  активная составляющая тока  $I_{\text{я}} \cos \varphi_1 = I_q = \text{const}$ .

Таким образом, степень возбуждения синхронного генератора влияет только на реактивную составляющую тока якоря.

Зависимость тока якоря  $I_{\text{я}}$  от тока в обмотке возбуждения  $I_f$  при неизменной активной нагрузке генератора выражается  $\nu$  - образной характеристикой (Рис. 1.22).

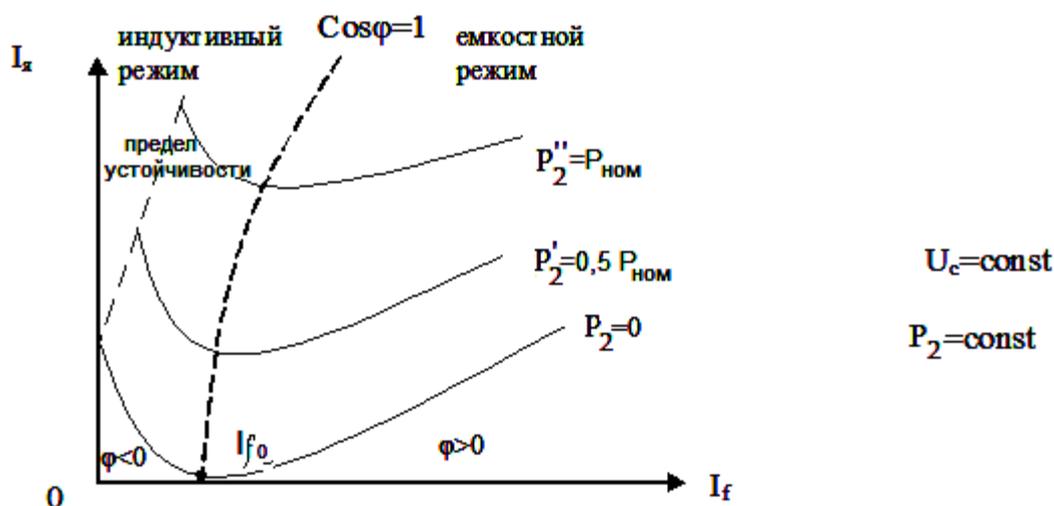


Рисунок 1.22  $\nu$  - образная характеристика синхронного генератора

$\vartheta$  – образные характеристики строятся при  $P_2 = const$ .  $\vartheta$  – образные характеристики синхронного генератора показывают, что любой нагрузке генератора соответствует такое значение тока возбуждения  $I'_f$  при котором ток якоря  $I_{я}$  становится минимальным и равным только активной составляющей тока  $I_{я min} = I_{я} \cos \varphi_1$ . В этом случае генератор работает при  $\cos \varphi = 1$ . Некоторое отклонение кривой  $\cos \varphi = 1$  вправо (Рис. 1.22) указывает на то, что при увеличении нагрузки ток возбуждения несколько возрастает из необходимости компенсации активного падения напряжения.

Необходимо иметь в виду, что при постепенном уменьшении тока возбуждения наступает такое его минимальное значение, при котором магнитный поток возбуждения оказывается настолько ослабленным, что синхронный генератор выпадает из синхронизма – нарушается магнитная связь между возбужденными полюсами индуктора и вращающимся полем якоря. Это показывает пунктирная линия предела устойчивости (Рис. 1. 22)

В режиме холостого хода мощность  $P_{эм} = 0$ , следовательно, угол  $\theta = 0$ . При этом ток  $I_f$  можно отрегулировать так, что  $\dot{E}_0 = -\dot{v}_c$ . Такое значение тока  $I_f = I_{f0}$  называют нормальным.

Увеличим ток возбуждения,  $I_f > I_{f0}$ , т. е. перевозбудим генератор. При этом  $\theta = 0$ ,  $\dot{E}_0$  и  $\dot{v}_c$  в противофазе, но проявляется разность  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - (-\dot{v}_c)$ , вектор которой направлен в сторону  $E_0$ . Под действием этой ЭДС ( $\Delta E$ ) появляется уравнительный ток, остающийся от  $\Delta E$  на  $90^\circ$ . Этот ток является чисто индуктивным относительно напряжения генератора и чисто емкостным по отношению к напряжению сети. Он создает продольную реакцию якоря, размагничивающий генератор, и намагничивает сеть (другие генераторы) являясь практически реактивным, этот ток не приводит к перераспределению активной нагрузки.

Если уменьшить ток  $I_f$ , так что  $I_f < I_{f0}$ , т. е. недовозбудить генератор, то все произойдет в обратном порядке. Появится уравнительный ток являющийся чисто емкостным относительно генератора и индуктивным по отношению к сети. Он стремится намагнитить генератор и размагнитить сеть.

Величина уравнительного тока  $I = \frac{\Delta E}{X_c}$ . Видно что уравнительный ток линейно зависит от  $\Delta E$ , а при  $v_c = const$  от ЭДС

$E_0$ . На рис. 1.23 приведены  $\vartheta$  – образные характеристики синхронного генератора с пояснениями.

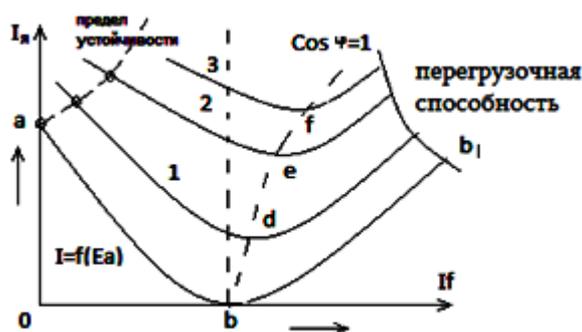


Рисунок 1.23  $\vartheta$  - образные характеристики синхронного генератора с пояснением характерных точек

На рис. 1.23 в точке «а»  $I_f = 0$ ,  $E_0 = 0$ ,  $I_a = \frac{U_c}{X_c}$ . В точке «б»  $I_a = 0$ ,  $E_0 = U_c$ . Линия «ab» недовозбуждение генератора при холостом ходе. Правая часть  $bb_1$  строится симметрично ab. Характеристики 1,2,3, три различные нагрузки  $3 > 2 > 1$  генератора. В точках d, e и f ток якоря имеет минимальное значение.

С точки зрения наименьших потерь в обмотках статоров генераторов работающих в сети наилучшие условия такие, при которых  $\cos\varphi$  одинаковы для всех. Следует отметить, что перераспределив реактивную мощность можно улучшить коэффициент мощности одного генератора. Однако уравнительный ток непременно вызывает ухудшение  $\cos\varphi$  другого генератора или группы генераторов в сети.

Граница работы недовозбужденной машины определяется ее статистической устойчивостью, а перевозбужденной – перегрузочной способностью.

Возможность регулирования реактивной мощности путем изменения тока обмотки возбуждения является важным достоинством синхронной машины.

### 1.10 Синхронный компенсатор.

Для создания магнитных полей в электротехнических устройствах энергосистем необходима реактивная мощность. Основными источниками реактивной мощности являются синхронные компенсаторы и конденсаторы.

Синхронным компенсатором (СК) называют синхронную машину, предназначенную для генерирования реактивной мощности.

Конструктивно синхронный компенсатор выполняется так же, как синхронный генератор. Отличие состоит в том, что они не имеют выходного конца вала. Мощность синхронного компенсатора 10 – 345 мВА при напряжении 6,6 – 15,75 кВ, число пар полюсов 6 и 8, частота вращения 750 – 1000 об/мин. Наибольшее распространение – горизонтальное исполнение с явнополюсным ротором. Так как вал не передает вращающего момента, он может иметь меньший диаметр, что дает возможность уменьшить размеры подшипников. Отсутствие выходного вала облегчает герметизацию машины, поэтому в синхронном компенсаторе широко применяется водородное охлаждение. Для включения в сеть используют обычно метод асинхронного пуска. Отсутствие момента сопротивления на валу облегчает пуск. Применяются и другие способы пуска, например, с приводным двигателем.

Рациональное распределение реактивной мощности в сетях между синхронными компенсаторами, генераторами, конденсаторами и двигателями имеет важное технико-экономическое значение. Синхронный компенсатор, включая в электрическую систему ближе к местам потребления электрической энергии, генерируемую ими реактивную мощность не приходится передавать на большие расстояния. Благодаря чему уменьшаются потери энергии в линиях электропередачи и при промежуточных трансформациях. Получаемая реактивная мощность от синхронных компенсаторов обходится дешевле, чем от синхронных генераторов электростанций. Конденсаторы дороже синхронных компенсаторов, имеют большие габариты и меньшую надежность, хотя и являются статистическими устройствами.

Нормальными являются перевозбужденный режим работы синхронного компенсатора когда он отдает в сеть реактивную мощность. Однако в периоды спада потребительских нагрузок (например ночью) не редко возникает необходимость работы синхронных компенсаторов так же и в недовозбужденном режиме, когда он потребляет из сети индуктивный ток и реактивную мощность. Синхронный компенсатор лишен приводного двигателя и с точки зрения режима своей работы является синхронным двигателем работающим на холостом ходу с  $M_B = 0$ . Ток синхронного компенсатора имеет небольшую активную составляющую, которая

идет на покрытие механических потерь (потерь в стали и меди) забирается из сети. По отношению к номинальной мощности активная мощность синхронного компенсатора составляет не более 1 – 2 %. Поэтому в отличие от приведенной ниже диаграммы (Рис. 1.24) имеется активная составляющая тока  $I_a$  соответствующей небольшой активной мощности.  $\dot{I}_a$  совпадает по фазе с  $\dot{v}_c$  и  $I_a \ll I_r$  - реактивная составляющая тока, отсюда  $I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \approx I_r$

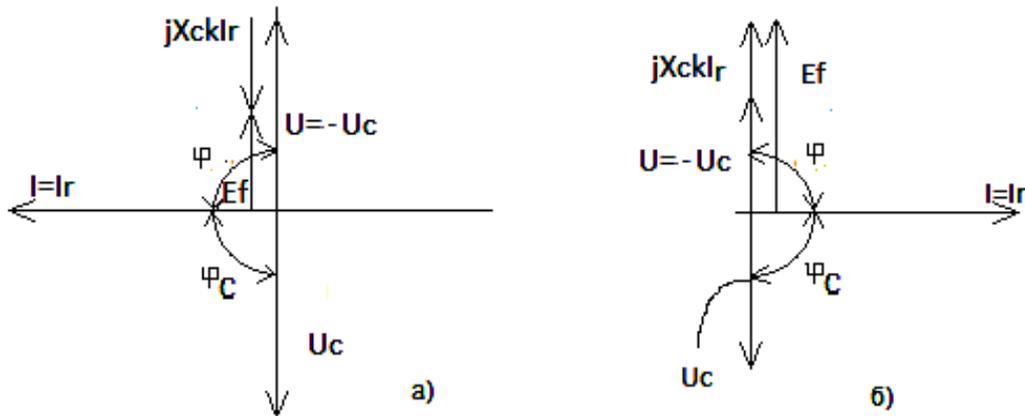


Рисунок 1.24 Векторные диаграммы синхронного компенсатора: а) недовозбужденный режим, б) перевозбужденный режим.

Так как в обмотках синхронного компенсатора протекают реактивные токи, которые не создают динамические усилия, крепление лобовых частей менее прочное, чем в турбогенераторах. Для снижения тока возбуждения синхронный компенсатор обычно выполняется с несколько меньшим воздушным зазором, чем синхронный двигатель.

Вышеприведенные диаграммы описывают электромагнитные процессы в синхронном компенсаторе без учета насыщения.

Наиболее важная характеристика синхронного компенсатора –  $v$  – образная характеристика  $I = f(I_f)$  (Рис. 1.25), построенная при  $v_c = const$ . Ей соответствуют характеристики синхронного генератора при  $P_{эм} = 0$ , ( $M_{эм} = 0$ ).

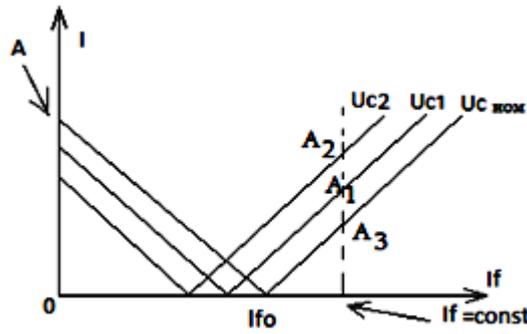


Рисунок 1.25  $\vartheta$  - образная характеристика синхронного компенсатора при различных напряжениях сети  $\vartheta_{c2} < \vartheta_{c1} < \vartheta_{cном}$

Точки А соответствует холостому ходу не возбужденной машины. При этом из сети потребляется намагничивающий ток  $I_1 = U_c / X_d$

По семейству характеристик (Рис. 1.25), можно судить о реакции синхронного компенсатора на изменение напряжения при  $I_f = const$ : при снижении напряжения реактивная мощность отдаваемая в сеть увеличивается, при увеличении - падает. Благодаря такой реакции на изменение напряжения синхронный компенсатор обладает свойством стабилизировать напряжение. Если компенсатор работает при  $\vartheta_c = \vartheta_{c1}$  (точка  $A_1$ ) с перевозбуждением, то при снижении напряжения сети получим точку  $A_2$  на кривой с  $\vartheta_{c2}$ . При этом компенсатор оказывается относительно более перевозбужденным и оказывает намагничивающее действие на генератор, способствуя поддержанию напряжения. При увеличении напряжения сети попадем в точку  $A_3$ , реакция генератора будет размагничивающая. При выборе параметров синхронного компенсатора не нужно заботиться об обеспечении достаточности статичной перегружаемости как в генераторе или двигателе (т. к.  $P_{эм} \approx 0$ , и он работает при угловой характеристике с  $\theta \approx 0$ ). Поэтому индуктивное сопротивление якоря вдоль оси в синхронном компенсаторе выбирается из требуемой величины реактивной мощности в режиме недовозбуждения.

$$Q_H = m v_H I_r = m \frac{v_H^2}{X_d}, \text{ тогда}$$

$$Q_* = \frac{1}{X_d}, \text{ обычно } Q_* = 0.4 \div 0.6, \quad X_* d = 2.5 \div 1.6$$

### 1.11 Синхронные двигатели: способы пуска, характеристики, области применения.

По своей конструкции синхронные двигатели в принципе не отличаются от синхронных генераторов, но все же имеют некоторые особенности. Их изготавливают преимущественно явнополюсными с  $2p = 6 \div 24$  полюсов; воздушный зазор делают меньшим, чем в генераторах такой же мощности, что способствует улучшению ряда параметров двигателя, в частности уменьшению пускового тока двигателя; демпферную (успокоительную) обмотку выполняют стержнями большого сечения, так как при пуске двигателя она является пусковой обмоткой; ширина полюсного наконечника достигает  $0,9\tau$  вместо  $0,7\tau$  в генераторах. Поэтому, несмотря на свойства обратимости, синхронные машины, выпускаемые промышленностью имеют обычно целевое назначение – либо это синхронные генераторы, либо синхронные двигатели. Индуктор синхронного двигателя может вращаться только с синхронной частотой  $n_1 = 60 f_1 / p$ , чтобы убедиться в этом предположим  $n_2 < n_1$ . В какой то момент времени намагниченные полюсы индуктора расположатся против одноименных полюсов вращающегося магнитного поля якоря и тогда нарушится магнитная связь между намагниченными полюсами индуктора и полюсами вращающегося поля якоря, так как их одноименные полюсы будут взаимно отталкиваться и индуктор, перестав испытывать устойчивое действие вращающегося электромагнитного момента остановится.

Вращение индуктора синхронных двигателей только с синхронной частотой составляет характерную особенность этих двигателей и часто определяет область их применения (например, для привода устройств требующих стабильной частоты вращения).

Синхронный двигатель является генератором реактивного тока: индуктивного по отношению к напряжению сети при недовозбуждении и емкостного при перевозбуждении. Указанная способность синхронных двигателей является их ценным качеством, которое используется при повышении коэффициента мощности электрических установок.

Асинхронные двигатели, являющиеся наиболее распространенными потребителями электроэнергии, работают при  $\cos \varphi_1 < 1$ , создавая в сетях значительные индуктивные токи. Если же параллельно группе асинхронных двигателей включить один или несколько синхронных двигателей, работающих с перевозбуждением,

то возникающая в сети емкостная составляющая тока будет частично или полностью компенсировать индуктивную составляющую тока, обусловленную работой асинхронных двигателей. При этом электрическая система, разгруженная от реактивных токов, будет работать с  $\cos \varphi_1 \approx 1$ , что способствует уменьшению потерь электроэнергии. Необходимо, однако отметить, что при перевозбуждении синхронный двигатель потребляет значительный ток якоря. Поэтому синхронные двигатели, предназначенные для работы с перевозбуждением, имеют несколько большие габариты, а КПД меньше, чем у двигателей, предназначенных для работы с  $\cos \varphi_1 = 1$ , когда ток якоря и потери двигателя имеют минимальные значения.

Аналогично синхронному генератору, включенному на параллельную работу с сетью, синхронный двигатель имеет предел устойчивости при минимальном токе возбуждения.

Угловые характеристики синхронного двигателя отличаются от угловых характеристик генератора лишь тем, что располагаются в третьем квадранте осей координат, то есть определяются отрицательным значением углов  $\theta$  и моментов (Рис. 1.26)

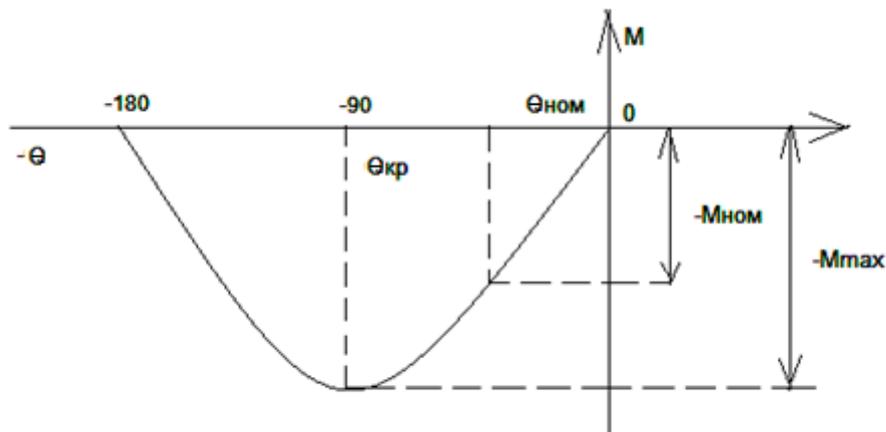


Рисунок 1.26 Угловая характеристика синхронного двигателя

Угловая характеристика синхронного двигателя соответствует угловой характеристике при  $\theta = 0 \div (-\theta_{кр})$ . отношение максимального электромагнитного момента к номинальному определяет перегрузочную способность синхронного двигателя:

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$$

Обычно перегрузочная способность синхронных двигателей  $\lambda = 1,2 \div 2$ , что при номинальной нагрузке соответствует  $\theta_{\text{ном}} = 30 \div 20$  эл. град.

Одним из основных недостатков синхронных двигателей является плохие пусковые свойства, которые ограничивают их применение. Пуск синхронных двигателей может быть частотным, при помощи разгона двигателя и асинхронный (включением на полное напряжения).

При частотном пуске обмотки статора синхронного двигателя подключаются к преобразователю частоты, который изменяет частоту от нескольких Гц до номинальной частоты 50Гц. При частотном пуске синхронный двигатель входит в синхронизм при малых частотах. Частотный пуск рационально использовать, если преобразователь частоты можно применять для пуска нескольких двигателей.

При пуске синхронного двигателя с помощью разгонного вспомогательного двигателя синхронный двигатель доводится до почти синхронной частоты вращения. В качестве разгонного двигателя может использоваться асинхронный двигатель, имеющий большую, чем синхронный, синхронную частоту вращения или двигатель постоянного тока, если есть сеть постоянного тока. Такой способ применяется редко так как разгонный двигатель используется только при пуске.

Наиболее распространенным является асинхронный пуск. Вследствие наличия специально выполненных короткозамкнутых контуров на индукторе (демпферная обмотка, установленная на массивных полюсных наконечниках), индуктор разгоняется до частоты вращения, близкой к асинхронной, как асинхронный двигатель. Обмотка возбуждения при этом закорачивается на активное сопротивление. После подхода индуктора к частоте вращения близкой к синхронной ( $S \approx 0.05$ ) обмотка возбуждения подключается к возбудителю и осуществляется грубая синхронизация машины.

Применяются так же пуск с наглухо присоединенным возбудителем. В этом случае при частоте вращения, равной  $(0,5 \div 0,7)$   $n_{\text{ном}}$  в обмотке возбуждения начинает протекать постоянный ток и машина начинает втягиваться в синхронизм. В этом случае имеет место большие броски тока и может осуществляться, если нагрузка двигателя не превышает  $(0,4 \div 0,5)$   $M_{\text{ном}}$ . Однако схема пуска

получается более простой и находит по этой причине все большее применение.

При тяжелых условиях пуска мощных синхронных двигателей применяется реакторный или автотрансформаторный пуск по схемам рассмотренным для асинхронных двигателей

Сравнивая синхронные двигатели с асинхронными, следует отметить основное преимущество синхронных двигателей – возможность работать с  $\cos\varphi = 1$ , а при перевозбуждении с опережающим  $\cos\varphi$ .

Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален  $\vartheta$ , а асинхронного  $\vartheta^2$ , по этому синхронные двигатели менее чувствительные к изменению напряжения сети и имеют большую перерезгрузочную способность.

К недостаткам синхронных двигателей относятся их более сложная конструкция и повышенная стоимость по сравнению с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Кроме того для работы синхронного двигателя требуется устройство для питания постоянным током обмотки возбуждения.

Опыт эксплуатации показал, что применение синхронных двигателей общего назначения наиболее целесообразно при мощности 200кВт и более в установках, не требующих частых пусков и регулирования частоты вращения (мощные насосы, вентиляторы, компрессоры и т.п.).

### 1.12 Специальные синхронные машины.

**Синхронные машины со сверхпроводящими обмотками возбуждения.** Предельная мощность турбогенераторов с внутренним водяным охлаждением обмоток якоря и индуктора ограничивается 2 млн. кВт. Дальнейший рост возможен применением сверхпроводящих обмоток возбуждения. При этом повышается КПД и снижается масса. В качестве охладителя индуктора применяется жидкий гелий, охладителя якоря – вода. Сверхпроводящая обмотка индуктора выполняется из ниобий – титановых шин. Плотность тока достигает  $100 \text{ А/мм}^2$ . Однако дефицит и стоимость гелия и сверхпроводящих материалов ограничивает применение криогенных машин.

**Машина с постоянными магнитами.** Одним из преимуществ машины со сверх проводящими обмотками возбуждения является то, что в них электрические потери в обмотке возбуждения равны нулю.

Этим преимуществом обладают и машины с постоянными магнитами, которые называются еще магнитоэлектрическими машинами. Наибольшее распространение получили микро синхронные двигатели с постоянными магнитами. Статор выполняется, как статор машин общего назначения. На роторе располагается постоянные магниты и пусковая короткозамкнутая обмотка. Выполнение ротора с постоянными магнитами может быть весьма разнообразным. Такие машины имеют ряд преимуществ: высокая надежность из-за отсутствие вращения обмоток, высокий КПД и меньшие габариты.

Недостатки: повышенная стоимость, масса и габариты, плохие пусковые свойства, трудности или невозможность регулирования потока возбуждения. Конструкция синхронных машин с постоянными магнитами определяется магнитными и техническими свойствами постоянных магнитов.

**Машины с когтеобразными роторами.** Как уже подчеркивалось преобразование энергии в электрической машине происходит в воздушном зазоре - пространстве, где концентрируется энергия магнитного поля. При этом форма магнитного поля определяет в основном энергетические показатели машины. Наилучшие характеристики можно получить при круговом поле.

При сосредоточенной катушечной обмотке синусоидальное распределение индукции в зазоре можно получить за счет определенного, профиля воздушного зазора. Например, с когтеобразным ротором (Рис. 1.27).



Рисунок 1.27 Синхронный генератор с когтеобразным ротором

Когтеобразная конструкция ротора позволяет получить многополюсный ротор посредством одной катушки возбуждения, подключаемой к источнику постоянного тока через контактные кольца 1 (Рис. 1.27). В таком роторе аксиально направленный магнитный поток возбуждения меняет свое направление в воздушном зазоре и становится радиально направленным. Рассмотренный генератор отличается простотой конструкции, компактностью,

надежностью и высокой технологичностью. Обычно эти генераторы изготавливаются небольшой мощности (менее 1кВА).

Ротор с когтеобразными полюсами широко применяются в синхронных генераторах, установленных на автомобилях. Генератор на автомобиле работает параллельно с аккумуляторной батареей, которую он должен подзаряжать, поэтому на выходе такой генератор должен иметь постоянное напряжение.

Принципиальная схема включения синхронного генератора с когтеобразными полюсами приведена на рис. 1.28

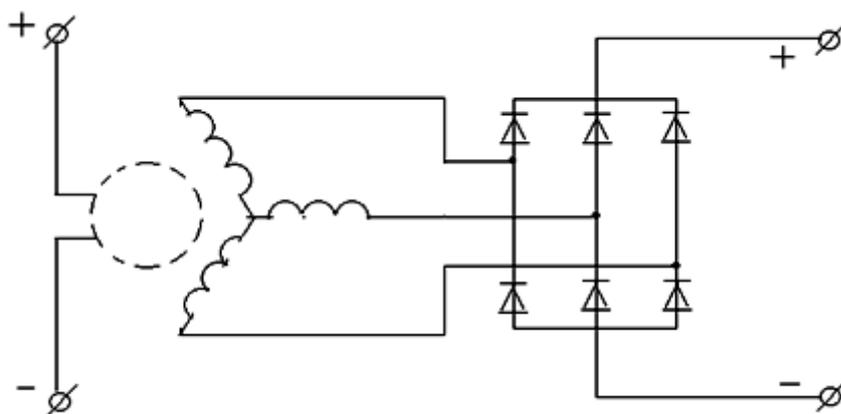


Рисунок 1.28 Принципиальная схема включения синхронного генератора с когтеобразными полюсами

Статор этого генератора представляет шихтованный пакет, на зубцах которого расположены катушки, образующую трехфазную обмотку соединенную звездой. Ротор состоит из вала, на который напрессованы две стальные шайбы с отогнутыми когтеобразными полюсами (по шесть полюсов на каждую шайбу). На вал насаживается стальная втулка, на которую надевается цилиндрическая катушка возбуждения, концы которой присоединены к контактными кольцам. На кольца наложены медно – графитовые щетки.

**Индукторные синхронные машины.** Некоторые устройства, например, установки индукционного нагрева, гироскопические и радиолокационные устройства, требуют для своей работы переменный ток повышенной частоты выражаемой сотнями и даже тысячами герц. Получение таких частот посредством синхронных генераторов обычной конструкции сопряжено с непреодолимыми трудностями, так как связано с необходимостью либо увеличения

частоты вращения свыше 3000 об/мин, либо чрезмерного увеличения числа полюсов, либо одновременного применения обоих мероприятий. Однако увеличение частоты вращения ведет к возрастанию центробежных усилий в роторе до опасных значений, а увеличение числа полюсов ведет к такому уменьшению полюсного значения  $\tau$ , при котором размещение обмотки на якоре становится практически невозможным.

Для получения переменного тока повышенной частоты (до 30кГц) применяют индукторные генераторы, отличительным признаком которых является то, что за один период магнитный поток в них не меняет своего знака, как в обычных синхронных генераторах, а лишь изменяется по величине от  $\Phi_{max}$  до  $\Phi_{min}$  значений, то есть пульсирует. Пульсирующий поток состоит из двух составляющих: постоянной  $\Phi_{cp}$  и  $\Phi_{пер}$ , представляющий собой периодически изменяющийся как по значению, так и по направлению магнитный поток с амплитудой  $\Phi_{пер} = 0,5(\Phi_{max} - \Phi_{min})$ . Постоянная составляющая потока не наводит в обмотках ЭДС, а переменная составляющая, сцепляясь с рабочей обмоткой генератора, наводит в ней ЭДС.

Все конструктивные схемы индукторных генераторов основаны на создании пульсации магнитного потока за счет изменения проводимости магнитной цепи, т.е. за счет пульсации магнитного потока. Для этого статору и ротору генератора придают зубчатую структуру. Когда зубец ротора находится против зубца статора, то магнитный поток в зубце статора приобретает наибольшее значение, когда же против зубца статора расположен паз ротора, то магнитный поток в зубце статора становится наименьшим. При этом частота изменений переменного магнитного потока, а следовательно, и частота ЭДС, наведенной в рабочей обмотке этим потоком, пропорциональны числу зубцов ротора  $Z_2$ :

$$f_1 = Z_2 n_2 / 60,$$

где  $n_2$  - скорость вращения ротора об/мин.

Рассмотрим одну из конструкций индукторного генератора, называемой сдвоенной (Рис. 1.29), якорь 1 и ротор 4 генератора выполнены сдвоенными. Обмотка 2 расположена на каждом зубце статора. Обмотка возбуждения 3 располагается на полусном наконечнике якоря и подключена к источнику постоянного тока и создает постоянный магнитный поток.

Весьма важным в индукторных генераторах является обеспечение постоянства общего магнитного потока при вращении ротора, так как в обмотке возбуждения  $Z$  в противном случае будет индуцироваться ЭДС высокой частоты. В рассматриваемом генераторе постоянство общего магнитного потока обмотки возбуждения будет обеспечиваться тем, что  $Z_2 = \frac{1}{2} Z_1$ , где  $Z_1$  - число зубцов магнитопровода статора. Благодаря этому магнитное сопротивление суммарному потоку возбуждения остается неизменным при любом положении ротора. Это позволяет ротор генератора сделать стальным монолитным (а не шихтованным) с профрезерованными пазами зубцов  $Z_2$ .

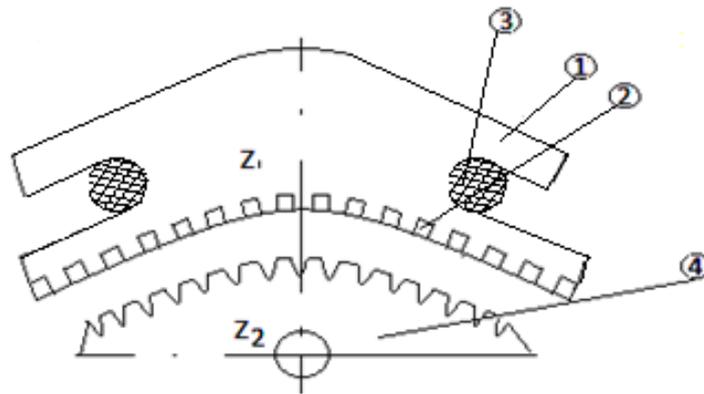


Рисунок 1.29 Индукторный синхронный генератор:

1 - Полюсный наконечник на статоре; 2 - Обмотка переменного тока; 3 - Обмотка возбуждения с постоянным током; 4 - массивный ротор

Высокочастотные индукторные генераторы выполняются частотой в десятки килогерц и мощностью в сотни кВт,  $f \equiv n_2 * Z_2$ . Как и все электрические машины индукторные машины обратимы. В двигательном режиме они применяются в качестве тихоходных и шаговых двигателей. Синхронная частота вращения зависит от частоты сети и числа зубьев ротора

$$n_2 = \frac{f}{Z_2} \quad \text{при } f = 50\text{Гц и } Z_2 = 50 \quad \text{можно получить } 1\text{об/с или } 60\text{ об/мин.}$$
 При больших диаметрах ротора и мелких зубцах можно получить частоту вращения до одного оборота в сутки. Индукторные двигатели выполняют двух-, трех- и однофазными. В однофазных индукторах двигателях применяются все способы пуска, ранее рассмотренные для обычных однофазных асинхронных двигателей.

**Шаговые двигатели.** Шаговые, или импульсные двигатели (Рис. 1.30). Питаются импульсами электрической энергии, а ротор в зависимости от полярности импульсов перемещается по часовой стрелке или против часовой на определенный угол - шаг. Шаговые двигатели обычно маломощные индукторные. Для управления шаговыми двигателями используется коммутаторы на полупроводниковых элементах, формирующие импульсы, которые подаются на фазы обмотки статора шагового двигателя. Шаг может быть от  $180^\circ$  до  $1^\circ$ . В специальных установках шаг может быть несколько минут.

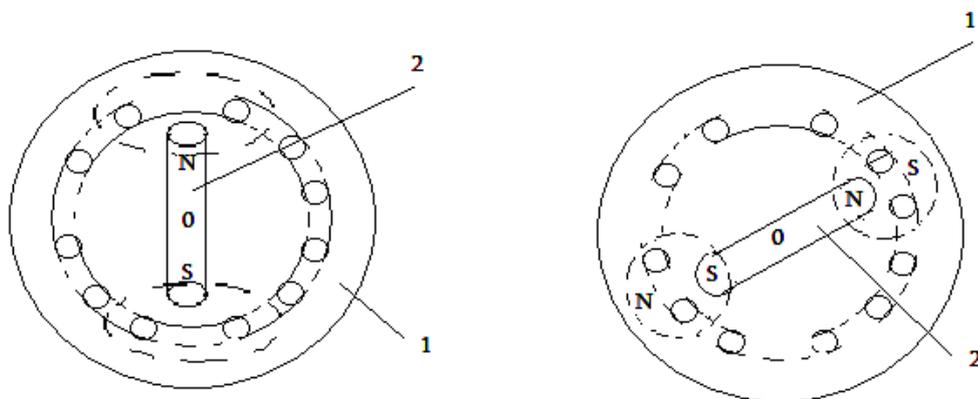


Рисунок 1.30 Принцип действия шагового двигателя: 1 - статор с обмотками управления; 2 - ротор с постоянными магнитами.

**Гистерезисные двигатели.** Недостатком синхронного двигателя являются плохие пусковые свойства. Гистерезисные двигатели сочетают в себе положительные качества асинхронного двигателя (хорошие пусковые характеристики) и синхронных двигателей – высокие энергетические характеристики в установившемся режиме. Такие качества достигаются выполнением индуктора из специального магнитного материала – сталь типа викаллой. При высоких частотах этот материал, как магнитомягкий, а при подходе индуктора к синхронной частоте вращения, - как магнитотвердый. Недостатком гистерезисных двигателей является то, что при нагрузках близких к номинальной, области намагничивания могут плавать и перемещаться по ротору. При этом машина выпадает из синхронизма. Выпускаются на мощности десятков Вт.

Конструкция якоря гистерезисного двигателя обычная. Индуктор выполняется в виде диска или цилиндра состоящая из кольца 1, изготовленного из магнитнотвердого материала (викаллоу), и магнитопровода 2 из магнитномягкого материала, размещенного на валу 3 (Рис. 1.31).

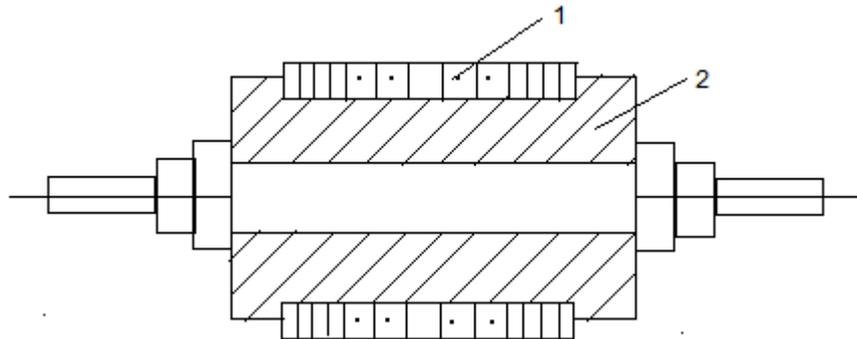


Рисунок 1.31 Устройство сборного ротора гистерезисного двигателя

На рисунке 1.32 приведены кривые намагничивания (петля гистерезиса) индуктора гистерезисного двигателя.

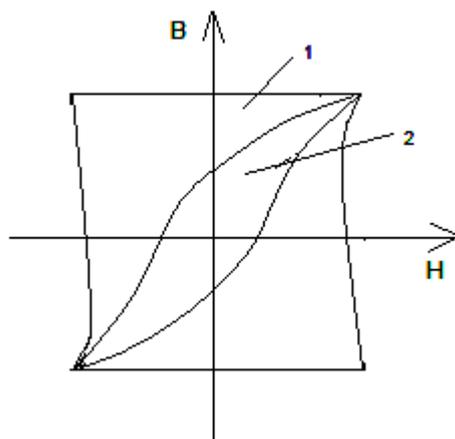


Рисунок 1.32 Кривые намагничивания: 1 - сплав викаллоу; 2 - магнитномягкий материал.

## Вопросы для самопроверки по главе

1. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
2. Объясните различие явнополюсных и неявнополюсных индукторов синхронных машин?
3. В чем состоит явление реакции якоря?
4. Каково действие реакции якоря при активной, индуктивной и емкостной нагрузках синхронного генератора?
5. Почему характеристика короткого замыкания синхронной машины имеет вид прямой линии?
6. Что такое ОКЗ и как влияет этот параметр на свойства синхронного генератора?
7. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
8. Чем ограничивается область устойчивой работы синхронного генератора?
9. Что такое синхронного генератора, включаемого на параллельную работу?
10. Что такое коэффициент статической перегружаемости?
11. Что такое синхронизирующая способность синхронной машины и какими параметрами она оценивается?
12. Объясните процесс пуска синхронного двигателя.
13. Как регулируется коэффициент мощности синхронного двигателя?
14. Каково назначение синхронного компенсатора?
15. Каковы достоинства и недостатки синхронных двигателей по сравнению с асинхронными?
16. Чем достигается большая частота пульсаций магнитного потока в индукторном генераторе?

## **2. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **2.1 Устройство машин постоянного тока (МПТ).**

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготавливают МПТ предназначенные для работы в различных отраслях промышленности, поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова. Машины постоянного тока по сравнению с машинами переменного тока имеют преимущество: при постоянном токе отсутствуют реактивная мощность, реактивные токи и реактивные сопротивления. Неподвижная часть называется статором, вращающаяся часть – якорем. Статор МПТ состоит из станины, сердечников главных и дополнительных полюсов и обмоток возбуждения, катушки которых охватывают сердечники полюсов. Число главных полюсов зависит от мощности и частоты вращения якоря, обычно 4-6 полюсов, в микромашинах – 2, в очень крупных машинах – до нескольких десятков. Сердечники главных полюсов набираются из листов конструкционной стали толщиной 1-2 мм стянутых шпильками, и крепятся с помощью шпилек к станине. Сердечники дополнительных полюсов выполняется стальными, массивными. Они крепятся к станине болтами. На главных полюсах установлены катушки одной или нескольких обмоток возбуждения. Катушки дополнительных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря. Станина является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины.

Магнитопровод якоря состоит из пакетов набранных из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5мм, как и в машинах переменного тока. Магнитопровод удерживается в спрессованном состоянии нажимными кольцами установленными с двух сторон якоря, в пазы магнитопровода укладываются изолированные секции якорной обмотки. Обмотки якоря, соединяются с электрической сетью постоянного тока с помощью механического преобразователя частоты, назначение которого – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса дугой полярности. Необходимость выпрямления или коммутации тока якоря путем механического «выпрямления» на коллекторе является основным недостатком МПТ.

Для упрощения конструкции механического преобразователя частоты машина имеет обращённое исполнение: обмотка

возбуждения питается постоянным током, располагается на статоре; обмотка якоря в которой при вращении индуцируется переменная ЭДС - на роторе. Это даёт возможность выполнить преобразователь частоты в виде вращающегося коллектора, к пластинкам которого присоединены выводы от секций обмотки якоря, и системы неподвижных щёток, осуществляющие контакт с пластинами якоря. Коллекторные пластины, изготавливаются из твердотянутой меди. Пластины изолированы друг от друга и вала якоря с помощью прокладок. После насадки на вал, наружная поверхность коллектора обрабатывается окончательно, что придаёт коллектору правильную цилиндрическую форму.

Щетки располагаются в щеткодержателях. Щеткодержатель состоит из обоймы в которую помещают щетку, курка, представляющего собой откидную деталь, передающую давление пружины на щетку. Щеткодержатель крепят на пальце зажимом. Общее количество щёточных пальцев равно числу полюсов, половина из них имеет положительную полярность – остальные отрицательную. Щетка снабжается гибким тросиком для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины. Одно из основных условий бесперебойной работы машины – плотный и надежный контакт между щеткой и коллекторными пластинами. Давление на щетку пружиной должно быть отрегулировано так, чтобы не вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, в другом случае – искрение на коллекторе. Как правило, щетки в машинах постоянного тока устанавливаются на геометрической нейтральной линии перпендикулярной оси полюсов, поэтому поле якоря перпендикулярно силовым линиям возбуждения.

Помимо указанных частей МПТ имеет два подшипниковых щита: передний и задний. Последний (со стороны коллектора) имеет смотровой люк с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки не разбирая машину. Вентилятор служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечник) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Конструкция МПТ определяется в основном мощностью и частотой вращения. Машины постоянного тока изготавливаются

мощностью от нескольких Вт до 20000 кВт, напряжением до 1000 В и частотой вращения от десятков до нескольких тысяч оборотов в минуту. Трудность построения МПТ на большую мощность и высокое напряжения относится к недостаткам этих машин.

Как все электрические машины, МПТ обратимы.

Двигатели постоянного тока (ДПТ) обеспечивают большие пределы регулирования частоты вращения при высоких энергетических показателях во всем диапазоне и механических характеристиках, удовлетворяющих требованиям большинства механизмов. ДПТ дороже асинхронного двигателя той же мощности в 2-3 раза, несмотря на это, он применяется во всех случаях, когда требуется получить особые свойства.

Генераторы постоянного тока (ГПТ) применяются для питания электролизных и гальванических установок и питания обмоток возбуждения синхронных машин.

ГПТ является источником питания для промышленных установок, потребляемых постоянный ток низкого напряжения. Широко распространены ГПТ специального назначения – сварочные, генераторы для освещения поездов, электромагнитные усилители.

Недостатком машин постоянного тока является их относительно высокая стоимость, а также наличие скользящего контакта в виде щетки и коллектора.

## **2.2 Обмотки якорей машин постоянного тока.**

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

Обмотки якорей МПТ делятся на простые и сложные. Обмотки, как правило, двухслойные, симметричные. Простые обмотки выполняются петлевыми и волновыми. В простой петлевой обмотке (Рис. 2.1) концы секции присоединяются к соседним коллекторным пластинам.

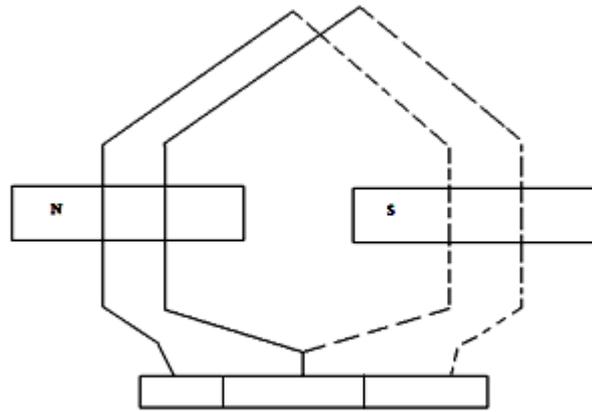


Рисунок 2.1 Простая петлевая обмотка якоря МПТ

В простой волновой обмотке (Рис. 2.2) концы секции присоединяются к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга примерно на полюсное деление машины  $\tau$ .

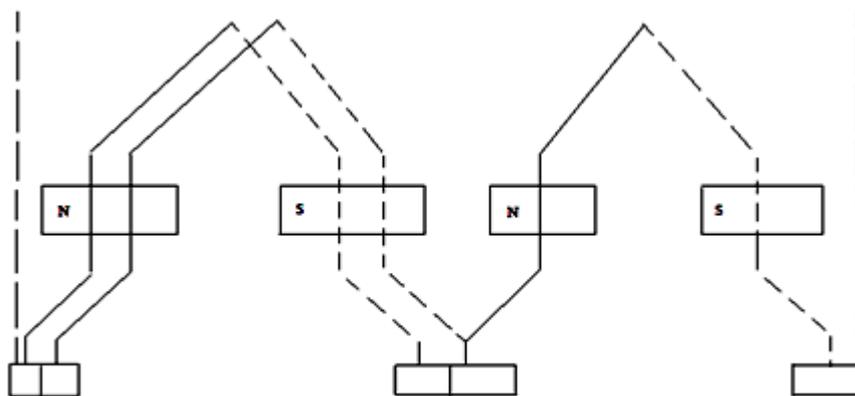


Рисунок 2.2 Простая волновая обмотка якоря МПТ

Сложные обмотки состоят из двух-трёх простых петлевых или волновых обмоток. Обмотки образуют катушки, которые укладываются в пазы. Ширина катушки почти равна полюсному делению. Катушка имеет общую пазовую изоляцию и состоит из одной или нескольких секций. Часть обмотки, присоединенная к двум коллекторным пластинам, называется секцией. Секция состоит из одного или нескольких витков. Виток состоит из двух или нескольких проводников. Секции образуют обмотку, которая может состоять из двух или нескольких параллельных витков. Прямолинейная часть секции лежащая в пазу, называется активной частью, она содержит две активные стороны – прямую и обратную. Скошенная часть служит только для соединения активных сторон секции и называется лобовой частью. Каждая ветвь имеет последовательно и параллельно

соединенные витки и проводники. Последовательно соединенные витки определяют напряжение, а параллельные - ток машины. Общий объём меди обмоток характеризует мощность машины.

Число элементарных пазов якоря совпадает с числом секций обмотки якоря и равно числу коллекторных пластин, так как к ним присоединены концы обмоток якоря. Ток в петлевой обмотке якоря делится на две параллельные ветви, число параллельных ветвей обмотки равно числу полюсов  $2p$ .

При выборе типа обмоток исходят из того, что ток в параллельной ветви не должен превышать 250 – 350 А. А это определяется рациональным выполнением пазов коллекторных пластин. Простая петлевая обмотка применяется в низковольтных машинах при больших токах в якоре. Так как в них, число параллельных ветвей  $2a$  равно числу полюсов. Простые волновые обмотки допускают сравнительно низкие токи, т.к. в них независимо от числа полюсов  $2a = 2$ , но они не требуют уравнивающих соединений, что является их достоинством.

Тот или другой тип обмотки выбирается в зависимости от величины тока, напряжения и мощности машины. Машины больших мощностей при низких напряжениях имеют большую величину тока и поэтому их выполняют с простой петлевой обмоткой. При малых токах и относительно высоких напряжениях выгоднее применять волновые обмотки.

Сложные обмотки применяются в машинах большой мощности, когда необходимо иметь большое число параллельных ветвей, а также в машинах с тяжёлыми условиями коммутации.

### 2.3 Коммутация

При вращении якоря машины секции (витки) обмотки проходят из одной параллельной ветви в другую. Процесс перехода секции из одной параллельной ветви в другую называется коммутацией. При коммутации изменяется ток в коммутируемых секциях от  $+I_{я}$  до  $-I_{я}$ , а ток в параллельных ветвях и поле якоря, создаваемое токами якоря, практически не изменяются.

Как в машинах переменного тока, частота изменения тока ( $f$ ) в секциях обмотки якоря определяется выражением  $f = \frac{pn}{60}$ . Ток и напряжение в секции обмотки якоря близко к прямоугольному (Рис. 2.3).

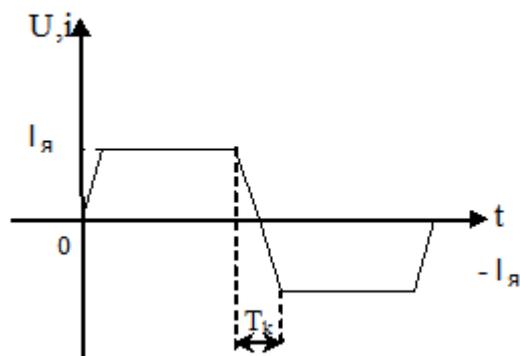


Рисунок 2.3 График зависимости напряжения и тока в обмотке якоря при коммутации от времени

За время  $T_k$  – период коммутации, происходит быстрое изменение тока в секции. Период коммутации зависит от частоты вращения и числа коллекторных пластин. Период коммутации  $T_k$  можно определить как время перемещения коллектора на ширину щетки:

$T_k = \frac{B_{ш}}{v_k}$ , где  $B_{ш}$  – ширина щетки,  $v_k$  – окружная скорость коллектора.

$v_k = \pi D_k \cdot n = B_k K \cdot n$ , где  $D_k$  – диаметр коллектора;  $B_k$  – ширина коллектора;  $K$  – число коллекторных пластин;  $n$  [об/сек]. Отсюда

$$T_k = \frac{B_{ш}}{B_k K \cdot n} = \frac{\beta_k}{K \cdot n}$$

Здесь  $\beta_k = \frac{B_{ш}}{B_k}$  – щеточное перекрытие. Для МПТ общепромышленного наполнения  $\beta_k = 2 \div 4$ , а для машин со сложными обмотками  $\beta_k = 6 \div 7$ .

При  $\beta_k = 2,5$  и  $n = 1500$  об/мин,  $K = 100$  в машине с простой петлевой обмоткой  $T_k = 0,001$  с. Таким образом, частота периодических коммутационных процессов  $f_k = \frac{1}{T_k}$  лежит в пределах  $1000 \div 3000$  Гц.

Коммутация в машине постоянного тока осуществляется коллектором – механическим преобразованием частоты. Коллектор или коммутатор может иметь и другие конструктивные исполнения. Например коммутаторы выполняются на базе полупроводников элементов – транзисторов или тиристоров, известны коммутаторы, выполненные на базе магнитоуправляемых контактов – герконов. Однако механический преобразователь частоты остается одним из

наилучших по своим массо – габаритным, энергетическим и другим показателям.

Коммутационными процессами называются и процессы под щеткой. Коммутационные процессы определяют надежность работы машины постоянного тока, их габариты и возможность применения в тех или иных электроприводах.

#### **2.4 Способы улучшения коммутации.**

На коммутацию в первую очередь влияет состояние поверхности коллектора и щеток, и правильный выбор материала коллекторных пластин и щеток. Коллекторные пластины выполняются из меди, а в машинах, работающих при тяжёлых условиях коммутации, из меди с присадкой кадмия. Щётки выполняются путём прессования из угольных и графитовых порошков. Щётки делятся на 4 группы: 1) угольно – графитовые; 2) графитовые; 3) электрографитовые; 4) металлографитовые. Наибольшее применение находят электрографитовые щётки, которые допускают плотность тока под щеткой до  $150 \text{ А/см}^2$  и линейную скорость  $60 \text{ м/с}$ . Эти щетки применяют для двигателей и генераторов со средними и затрудненными условиями коммутации. При правильном выборе марки щеток и правильной эксплуатации машины постоянного тока в результате электролиза на коллекторе образуется политура, состоящая из пленки окисав меди. Наличии политуры на коллекторе является свидетельством хорошей коммутации машины.

На коммутацию значительное влияние оказывают механические причины – биение коллектора, плохая обработка, выступание изоляции коллекторных пластин, вибрации щеток и щеткодержателей. Механические причины особенно сильно влияют на коммутацию быстроходных машин. Условия эксплуатации машин постоянного тока – загрязнение коллектора, влажность, атмосферное давление, наличие в окружающем воздухе химических веществ – также значительно влияют на коммутацию.

Коммутация ухудшается при уменьшении атмосферного давления. На самолетах применяются специальные высотные щетки. При работе в керосине в погружных машинах постоянного тока обеспечивается удовлетворительная коммутация.

Одной из причин плохой коммутации – появление искрения на коллекторе, которое связано с возникновением больших напряжений между коллекторными пластинами.

При расчете машин постоянного тока число коллекторных пластин выбирается из условия, чтобы среднее напряжение между коллекторными пластинами не превышало  $15 \div 20$  В. При малом количестве коллекторных пластин эдс и ток получаются пульсирующим. Поэтому МПТ стараются изготовить с относительно большим числом коллекторных пластин.

Для улучшения коммутации стремятся уменьшить число витков в секции. Для этого увеличивают число коллекторных пластин. Чтобы не делать мелкие пазы, в пазы укладывают в два слоя не одну, а две или три секции. При составлении схем обмоток пользуются понятием числа эффективных пазов  $z_{\text{э}}$ . При этом  $z_{\text{э}} = s = k$ , где  $s$  - число секций обмоток;  $k$  - число коллекторных пластин. Для упрощения технологии намотки, катушки якоря выполняют секционной (из одной, двух или трех секций).

При нагрузке, из-за реакции якоря может  $\text{grad } U$  иметь большое значение и вызвать пробой изоляции промежутков между отдельными пластинами, что, в свою очередь, может повлечь пробой других пластин и появление кругового огня на коллекторе, когда дуга возникает между щетками. Круговой огонь обычно приводит к плавлению коллектора и выходу из строя машины.

Компенсационная обмотка компенсирует поле поперечной реакции якоря, устраняет искажение поля в воздушном зазоре и сохраняет распределение напряжения на коллекторе таким же, что и при холостом ходе. Улучшение практически достигается и путем правильного подбора щеток. Для улучшения коммутации желательно выбирать щетки с высоким активным сопротивлением, но увеличение сопротивления щеток приводит к увеличению потерь и нагрева щеток, что может ухудшить коммутацию. При расчете коммутации необходимо правильно удовлетворить противоречивым требованиям.

При проектировании щетки подбирают согласно ГОСТ, в котором указаны преимущественные применения той или иной марки щеток, переходное падение напряжения, плотности тока под щеткой, допустимая скорость и давление пружины на щетку. С учетом накопленного опыта эксплуатации щеток и правильного расчета машина можно обеспечить удовлетворительную коммутацию для большинства тяжелых условий применения МПТ.

Главным средством улучшения коммутации МПТ является применение дополнительных или добавочных полюсов, которые в зоне коммутации создают внешнее поле, компенсирующее реактивную ЭДС. Если бы удалось полностью компенсировать ЭДС самоиндукции, коммутация была бы благоприятной даже при очень больших перегрузках. К сожалению, полное устранение этих ЭДС невозможно, и после определенной величины перегрузка (1,5 – 2 от номинального) начинается недопустимое искрение щеток машины.

Добавочные полюсы устанавливаются в зоне коммутации между главными полюсами. Обмотки добавочных полюсов соединяются последовательно с обмоткой якоря, поэтому МДС обмоток добавочных полюсов следит за изменением тока в якоре при установившихся и переходных процессах.

Добавочные полюсы должны иметь определенный порядок следования по отношению к главным полюсам в генераторном и двигательном режимах.

При наличии добавочных полюсов щетки необходимо помещать точно на геометрической нейтрали.

Под геометрической нейтралью понимают линии симметрии, разделяющую северный и южный полюсы. На этой линии при холостом ходе магнитная индукция равна нулю.

Все машины постоянного тока мощностью выше одного кВт для обеспечения удовлетворительной коммутации выпускаются с добавочными полюсами.

В машинах небольшой мощности скомпенсировать реактивную ЭДС можно путем смещения щеток с геометрической нейтрали на одну – две коллекторные пластины по направлению вращения в генераторном режиме, а в двигательном режиме – против направления вращения. Этот способ улучшения коммутации имеет недостаток, связанный с тем, что реактивная ЭДС компенсируется в одном режиме работы машины.

Автоматической настройки при изменении нагрузки, которое есть в машинах с добавочными полюсами при сдвиге щеток с геометрической нейтрали нет.

Рассмотренные основные способы улучшения коммутации не исчерпывают возможностей влияния на сложные быстро протекающие процессы коммутации.

По ГОСТ коммутация по степени искрения делится на 5 классов: 1- отсутствие искрения (темная коммутация); 1 ¼- слабое

искрение под небольшой частью щетки; 1 ½- искрение под большой частью щетки; 2 – искрение под всем краем щетки; 3 – значительное искрение под всем краем щетки с крупными и вылетающими искрами. Степень искрения определяется визуально.

Степень искрения 3 недопустима, т. к. приводит к значительному почернению, не устранимому протиранием поверхности коллектора бензином. Такое искрение приводит к подгару и разрушению щеток. Степень искрения 2 допускается только при кратковременных режимах работы и перегрузках. При таком искрении появляются следы почернения на коллекторе, не устранимое протиранием бензина.

При степени искрения 1 ½ появляется следы почернения на коллекторе, которые легко устраняются путем протирания поверхности коллектора бензином.

При степени искрения 1 и 1 ¼ длительная работа машины не приводит к почернению коллектора и появлению нагара на щетках. При настройке коммутации при длительном режиме работы машины необходимо обеспечить эти две степени искрения.

Обеспечить удовлетворительную коммутацию в процессе проектирование машины не всегда удается поэтому после изготовления опытных образцов проводится экспериментальная настройка коммутации.

## 2.5 Получение постоянной ЭДС якоря.

Нарисуем модель якоря двухполюсной машины.

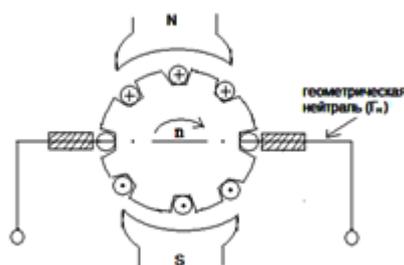


Рисунок 2.4 Модель якоря МПТ с двумя полюсами

Пусть якорь приводится во вращение внешним устройством с угловой скоростью  $\omega$  (или  $n = \frac{30\omega}{\pi}$ ) в указанном на рисунке направлении. В проводниках лежащих в пазах якоря и пересекающие линии магнитного поля нормальной к ней с магнитной индукции  $B$  в зазоре между полюсом и якорем, наводятся ЭДС:

$$e = Blv,$$

где  $l$  – длина проводника (якоря);

$v$  – линейная (окружная) скорость проводников.

Соединительные проводники на торцовых поверхностях якоря (лобовые части) не пересекают магнитные линии и в них ЭДС не наводятся. Применением известного правила правой руки для определения направления ЭДС в активных проводниках, можно убедиться, что во всех проводниках, движущихся под одноимёнными полюсами, ЭДС направлен одинаково. Под северными и южными полюсами направления ЭДС противоположны. В проводниках, проходящих геометрические нейтралы, ЭДС не наводятся т.к. здесь  $B = 0$ . Таким образом при вращении якоря в его проводниках наводятся переменные ЭДС. Обмотка якоря машины постоянного тока представляет собой замкнутый контур. Однако ток в них не возникает, т.к. алгебраическая сумма значений ЭДС всех последовательно соединённых проводников обмотки равен нулю: машина выполняется с равным числом проводников под каждым полюсом, магнитные потоки полюсов одинаковы, полярность полюсов чередуется.

Если на геометрических нейтралах установить неподвижные щётки, то между ними будут проводники обмотки с одинаково направленными ЭДС, сумма которых максимальна и постоянна.

В результате установки щёток и соединения их с внешней цепью обмотки якоря по отношению к его зажимам оказывается разделённой на параллельно соединённые ветви с одинаковыми ЭДС  $E$  и сопротивлениями  $R_a$  (Рис. 2.5).

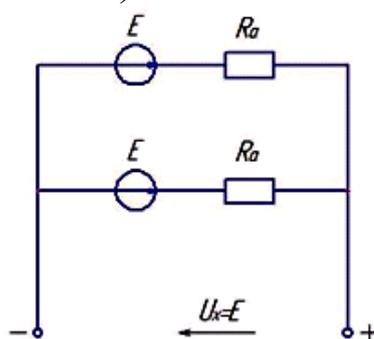


Рисунок 2.5 Схема замещения обмотки якоря с двумя параллельными ветвями.

При вращении якоря картина распределения ЭДС не изменяется, меняются только номера проводников, входящих в параллельные

ветви. Разность потенциалов между щётками остаётся практически постоянной.

Замкнутую обмотку якоря можно получить двумя способами: соединять на коллекторе проводники обмотки, двигаясь вперёд – назад, т.е. возвращаясь назад к соседнему проводнику (Рис. 2.6а) или только вперёд, обходя проводники якоря, двигаясь всё время в одном направлении (Рис. 2.6 б).

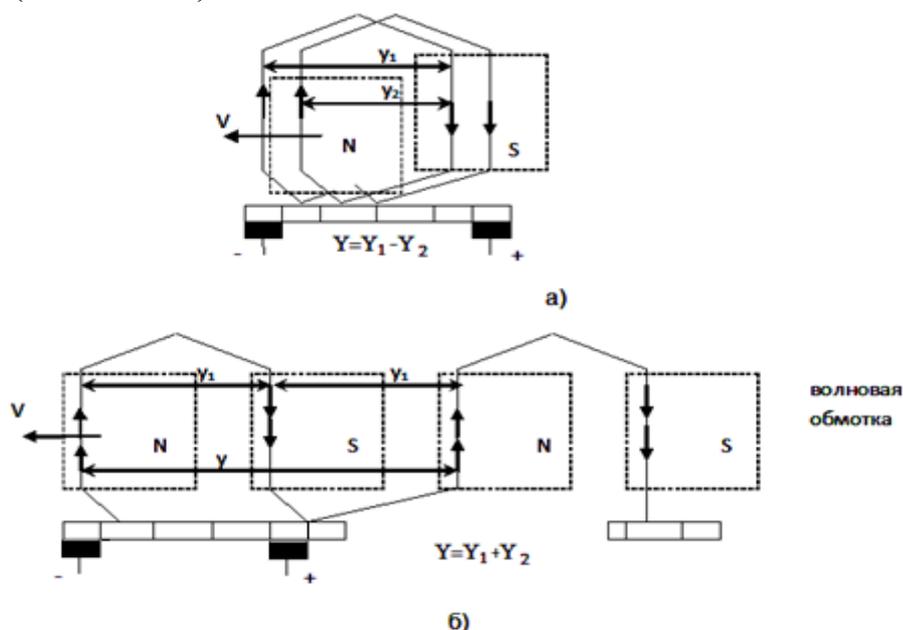


Рисунок 2.6 Способы получения замкнутых обмоток якоря:  
а) петлевая обмотка; б) волновая обмотка.  $Y_1$ - первый частичный шаг;  $Y_2$  - второй частичный шаг;  $Y$  - результирующий шаг петлевой обмотки.

Очевидно, в любом случае каждый следующий проводник должен находиться под полюсом противоположной полярности. Это означает, что шаг обмотки близок к полюсному делению  $\tau$ .

В петлевых обмотках при числе полюсов больше двух (4,6,8 и т.д) число параллельных ветвей «а» и щёток равно числу полюсов «р». В волновых обмотках число параллельных ветвей и щёток вне зависимости от числа полюсов равно двум ( $2a=2$ ), как уже отмечалось ранее.

## 2.6 Электродвижущая сила машины постоянного тока.

При вращении обмотки якоря в магнитном поле полюсов в проводниках обмотки, как указывалось, наводится ЭДС

$$e_j = B_j l v.$$

Эдс  $E$  якоря машины постоянного тока равна сумме мгновенных ЭДС  $e_i$  проводников одной из параллельных ветвей обмотки якоря. В современных якорных обмотках соединённые последовательно друг с другом секции образуют замкнутую на себя цепь. Если в общем случае обмотка машины имеет  $a = 1, 2, 3 \dots$  пар параллельно работающих ветвей-й, общее число проводников якоря равно  $N$ , а число параллельных ветвей  $2a$ , то эдс одной ветви, содержащей  $N/2a$  проводников:

$$E = \sum_{j=1}^{N/2a} \ell_j = l\vartheta \sum_{j=1}^{N/2a} B_j, \text{ где:}$$

$$\vartheta = \frac{\pi D n}{60},$$

$D$  - диаметр якоря.

Распределение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре МПТ приведено на Рисунке 2.7

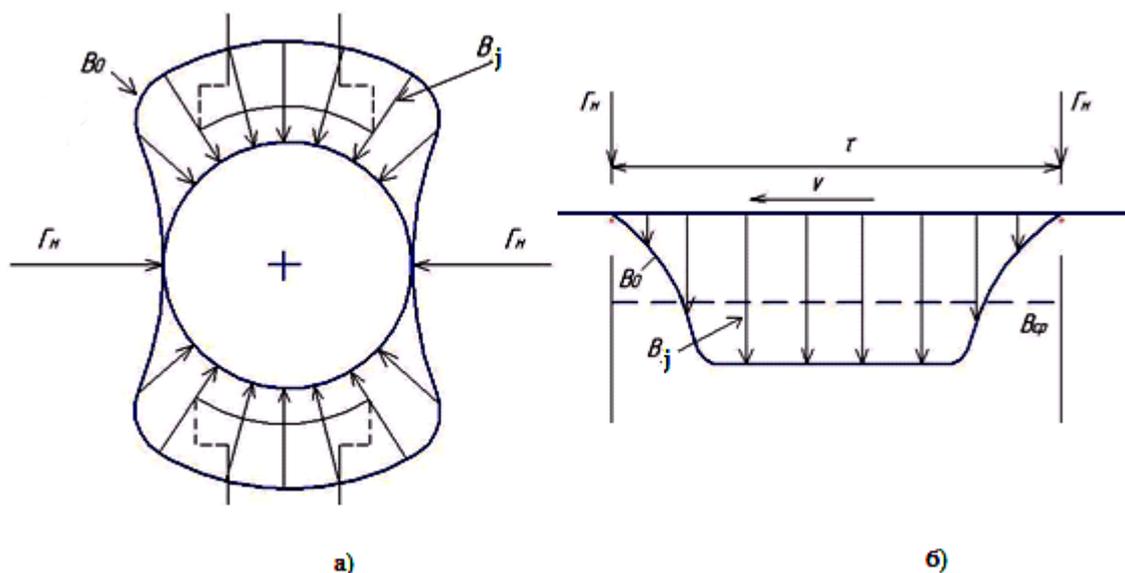


Рисунок 2.7 Распределение нормальной к поверхности якоря составляющей магнитной индукции  $B_0$ : а) относительно воздушного зазора; б) распределение индукции развернутой в плоскость относительно полюсного деления  $\tau$ .

Сумма  $\sum_{j=1}^{N/2a} B_j$  можно выразить через среднее значение магнитной индукции  $B_{cp}$  на полюсном делении  $\tau$  (Рис. 2.7б):

$$\sum_{j=1}^{N/2a} B_j = \frac{N}{2a} B_{\text{ср}},$$

где  $B_{\text{ср}} = \frac{\phi}{\tau l}$ ;  $\phi$  - магнитный поток;

$\tau = \frac{\pi D}{2p}$  - полюсное деление. Произведя подстановки

получим

$$E = \frac{\pi D}{60} n \cdot \frac{N}{2a} \cdot \frac{\phi 2p}{\pi D} = \frac{Np}{60a} n\phi$$

и окончательно  $E = C_E n\phi$ .

Таким образом, ЭДС обмотки якоря пропорциональна частоте вращения якоря и магнитному потоку главных полюсов машины. Постоянная для данной машины величина  $\frac{pN}{60a} = C_E$  называется конструктивным коэффициентом ЭДС.

## 2.7 Принцип действия двигателя и формула электромагнитного момента.

Если подать на зажим неподвижного якоря МПТ напряжение от какого нибудь источника, то оно вызовет ток в цепи якоря (Рис. 2.8)

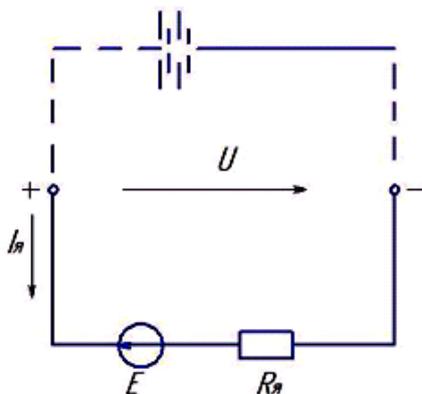


Рисунок 2.8 Схема замещения цепи якоря

Пусть направление токов в проводнике якоря будет таким как на рис. 2.9 по правилу левой руки найдем направление электромагнитных сил ( $F_{\text{эм}}$ ), они создают вращающий момент. Машина будет работать в качестве электродвигателя.

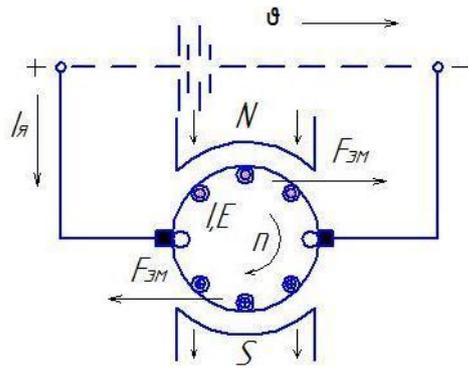


Рисунок 2.9 Направление токов и электромагнитных сил на якоре

Электромагнитная сила  $F_{эм}$  действующая на проводник с током в магнитном поле равна

$$F_{эм} = BIl$$

В поле одного полюса находится  $N/2p$  проводников якоря с одинаковыми токами направленных ветвей  $I_a = I_{я}/2a$ . Все силы одинаково направлены по касательным к окружности якоря. Используя сумму сил действующих на проводники якоря получим:

$$F_{эм} = I_a l \sum_{i=1}^{N/2p} B_i = I_a l B_{ср} \frac{N}{2p} = I_a l \frac{N \phi}{2p \tau l} = I_a l \frac{N \phi 2p}{2p l \pi D}$$

Электромагнитный момент создаваемый проводниками якоря равна

$$M = \frac{D}{2} \cdot F_{эм} \cdot 2p = \frac{pN}{2\pi a} I_{я} \phi \quad [H \cdot M] \text{ и окончательно}$$

$$M = C_M \cdot I_{я} \phi$$

Таким образом, электромагнитный момент пропорционален току якоря и магнитному потоку полюсов. Постоянная для данной машины величина  $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$  называется конструктивным моментом. Он связан с конструктивным коэффициентом ЭДС постоянным соотношением

$$C_M / C_E = \frac{60}{2\pi} \approx 9,57.$$

## 2.8 Поле машины постоянного тока при нагрузке.

При холостом ходе генератора магнитное поле машины образовано только главными полюсами (Рис. 2.10а). Оно

симметрично относительно оси полюсов и его ось совпадает с осью полюсов. Когда генератор работает с нагрузкой, по обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле, называемое полем якоря (Рис. 2.10б)

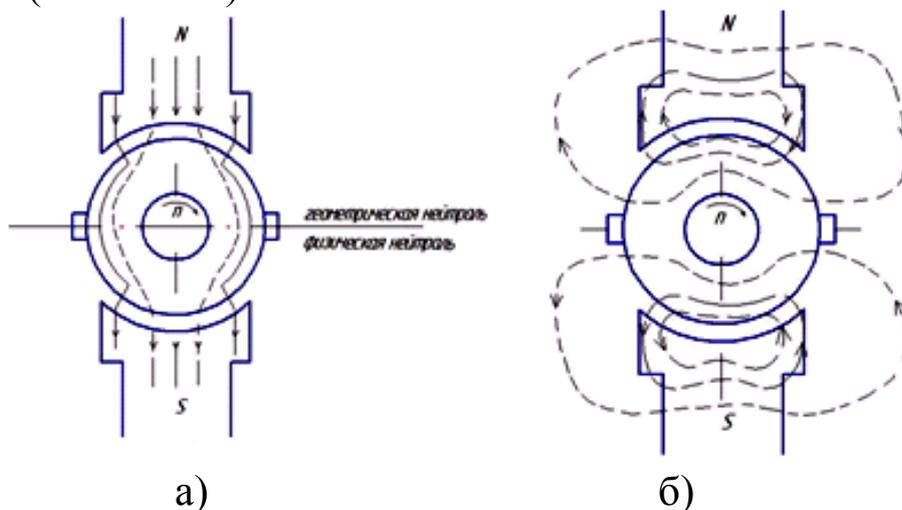


Рисунок 2.10 Картина поля обмотки возбуждения МПТ при холостом ходе а); картина поля обмотки якоря при отсутствии тока в обмотке возбуждения б).

При нагрузке машины протекает ток как по обмотке возбуждения, так и по обмотке якоря и результирующее поле в воздушном зазоре машины искажается в результате наложения поля якоря на поле возбуждения (Рис. 2.11).

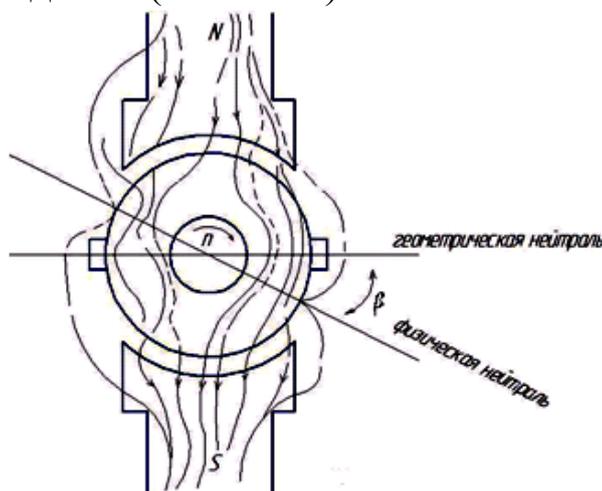


Рисунок 2.11 Картина поля МПТ при наложении полей обмотки возбуждения и якоря. Генераторный режим.

Влияние поля якоря на поле возбуждения машины называется реакцией якоря. Реакция якоря искажает поле, которое было при холостом ходе. При этом смещается на угол  $\beta$  физическая нейтраль – линия, перпендикулярная силовым линиям поля или соединяющая

точки на якоре машины, где  $B_{\delta} = 0$ . При х.х. физическая нейтраль совпадает с геометрической. В генераторном режиме физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря (Рис. 2.11). В режиме работы двигателем ток в якоре меняет свое направления на обратное и физическая нейтраль смещается в сторону, противоположную вращению якоря. В генераторном режиме под набегающим краем полюса поле ослабляется, а под сбегающим – усиливается. В двигательном режиме – обратная картина. Рассматриваемая реакция якоря называется поперечной.

Из-за насыщения ослабление поля проявляется сильнее, чем усиление, поэтому поперечная реакция якоря не только искажает поле, но и уменьшает результирующий поток при нагрузке по сравнению с потоком при холостом ходе.

Чтобы определить уменьшении поля при нагрузке за счет влияния поперечной реакции якоря рассмотрим поле под полюсами (Рис. 2.12).

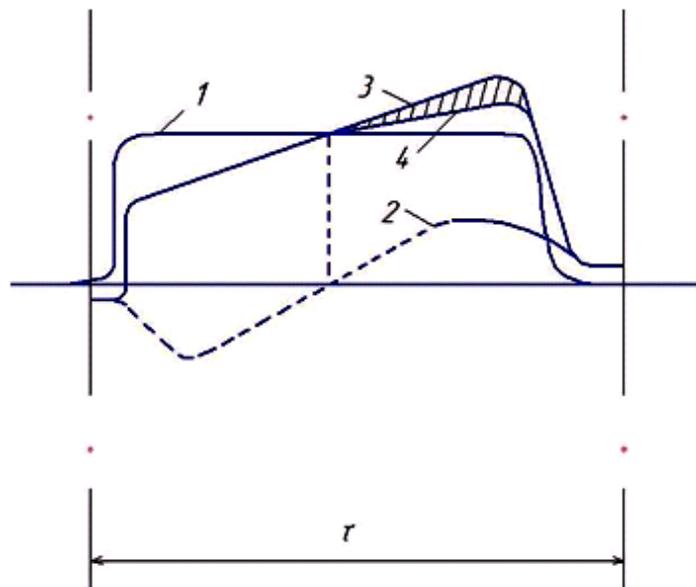


Рисунок 2.12 Кривые индукции в воздушном зазоре МПТ.

На рисунке 2.12 показаны кривые индукции в воздушном зазоре МПТ от тока обмотки возбуждения 1 и тока обмотки якоря 2 при нагрузке. Кривая индукции в зазоре при нагрузке является результатом сложения кривых 1 и 2. В ненасыщенной машине уменьшение поля под одним краем полюса компенсируется увеличением поля под другим (кривая 3). Но в насыщенной машине при сложении полей увеличение поля происходит на меньшее значение, чем его уменьшение при вычитание полей (кривая 4).

Таким образом, реакция якоря уменьшает результирующий поток на размер заинтригованной площади.

Размагничивающее действие поперечной реакции якоря влияет на характеристики машины и это необходимо учитывать при проектировании и анализе работы машины постоянного тока.

Поперечную реакцию якоря можно скомпенсировать, применив компенсационную обмотку. Компенсационная обмотка располагается в пазах наконечников главных полюсов. Поле поперечной реакции якоря неподвижно относительно полюсов. Поэтому, располагая в пазах на статоре обмотку, МДС которой направлена встречно с МДС обмотки якоря, можно скомпенсировать поле реакции якоря.

Компенсационная обмотка включается последовательно с обмоткой якоря и МДС компенсационной обмотки примерно равна МДС поперечной реакции якоря. Компенсационная обмотка применяется в машинах с мощностью выше 50÷60кВт и в машинах с тяжелыми условиями коммутации.

При работе МПТ в двигательном режиме смещение физической нейтрали относительно геометрической приводит к нежелательным последствиям: уменьшается вращающий момент двигателя, так как часть проводников параллельной ветви, располагаются между щеткой и физической нейтралью, будет находиться в зоне полюса противоположной полярности – эта часть проводников будет создавать тормозной эффект.

Как и у генератора, переключение обмоток якоря из одной параллельной ветви в другую происходит не на физической нейтрали, а на геометрической, где расположены щетки и где результирующее поле не равно нулю, что приводит к искрению щеток и обгоранию коллекторных пластин.

Необходимо уменьшить влияние реакции якоря и с этой точки зрения наиболее действенным и распространенным средством уменьшения влияния реакции якоря на работу машины является применение дополнительных полюсов. Дополнительные полюсы устанавливаются на геометрической нейтральной линии - между главными полюсами (Рис. 2.13).

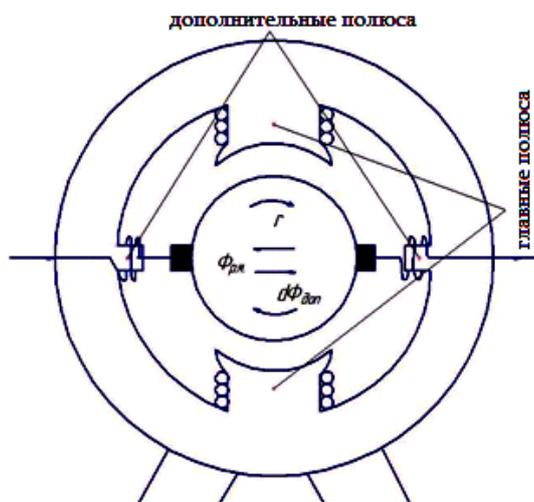


Рисунок 2.13 Расположение на станине МПТ дополнительных и главных полюсов.

Обмотки дополнительных полюсов включаются последовательно с обмоткой якоря и намотаны так, что их магнитное поле направлено против магнитного поля якоря. В зоне геометрической нейтральной линии создаются условия, благоприятные для безискровой работы щеток. Дополнительные полюсы выполняют свою функцию во всех режимах работы машины: при изменении нагрузки, при переходе машины из режима двигателя в режим генератора и наоборот.

Наличие добавочных полюсов позволяют увеличить линейную нагрузку машины и при заданной мощности получить машину меньшего веса и габаритов. Все машины постоянного тока мощностью свыше 1 кВт снабжаются добавочными полюсами, число которых принимается равным числу главных полюсов.

В машинах малой мощности (до нескольких сотен Вт) вместо дополнительных полюсов применяют сдвиг щеток с геометрически нейтральной линии.

## 2.9 Классификация машин постоянного тока по способам возбуждения.

Двигательный режим (на нижеприведенных схемах не показаны обмотки дополнительных и компенсационных обмоток):

1. Двигатель независимого возбуждения. Якорь (1) и обмотка возбуждения (ОВ) питаются от независимых источников постоянного тока ( $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ ) (Рис. 2.14)

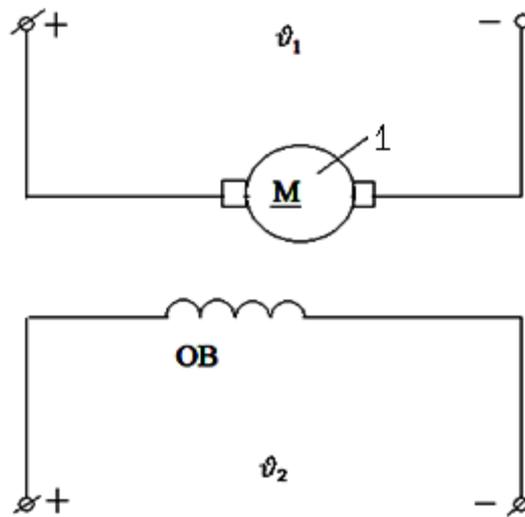


Рисунок 2.14 Электрическая схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

2. Двигатель параллельного возбуждения (иногда их называют шунтовыми). Якорь и обмотки возбуждения питаются от одного и того же источника постоянного тока (Рис. 2.15)

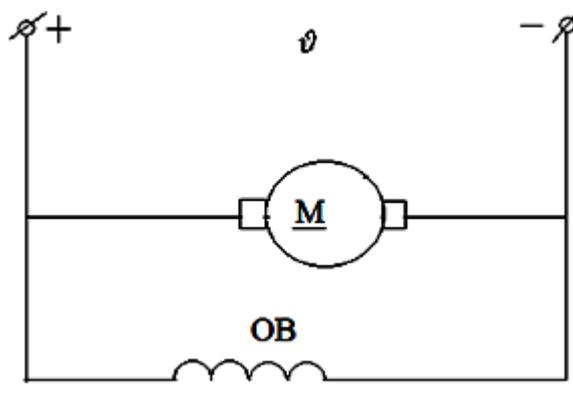


Рисунок 2.15 Электрическая схема двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

3. Двигатель последовательного возбуждения (иногда их называют сериесными). Якорь и обмотка возбуждения включены последовательно и питаются от одного источника питания постоянного тока (Рис. 2.16)

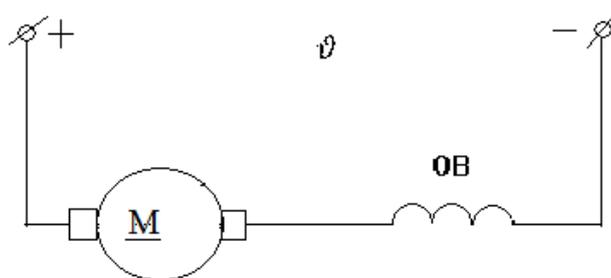


Рисунок 2.16 Электрическая схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

4. Двигатель смешанного возбуждения. Обмотка возбуждения состоит из двух частей. Одна часть обмотки возбуждения (ОВ1) включена параллельно якорю, а вторая часть (ОВ2) – последовательно с цепью якоря (Рис. 2.17)

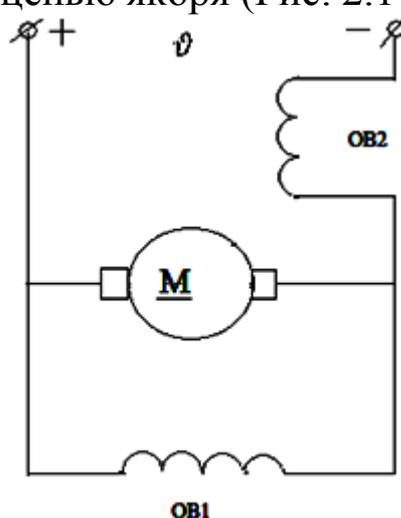


Рисунок 2.17 Электрическая схема двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Генераторный режим.

1. Генератор с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения питается от независимого источника питания ( $\vartheta$ ) (Рис. 2.18). Якорь приводится во вращение внешним устройством, на нагрузке ( $R_H$ ) протекает ток ( $I_{я}$ ).

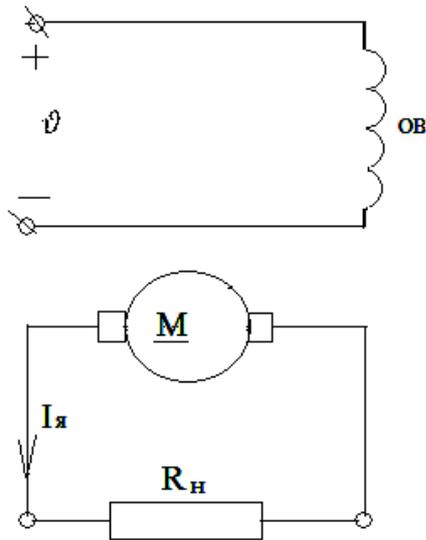


Рисунок 2.18 Электрическая схема генератора постоянного тока независимого возбуждения

2. Генератор с самовозбуждением. Обмотка возбуждения питается электрической энергией вырабатываемой самой машиной:
- с параллельным возбуждением (шунтовые) (Рис. 2.19)

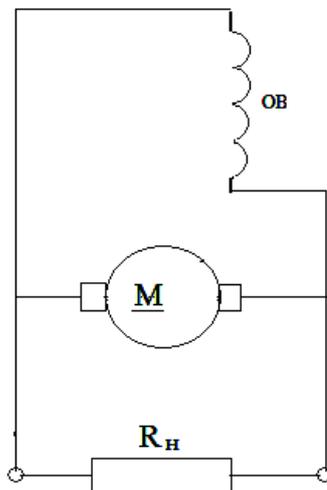


Рисунок 2.19 Электрическая схема шунтового генератора

- последовательного возбуждения (серийные) (Рис. 2.20)

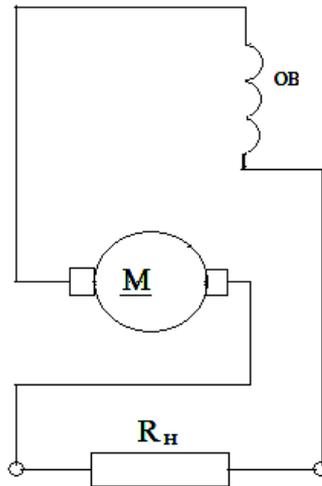


Рисунок 2.20 Электрическая схема серийного генератора

- со смешанным возбуждением (компаундные) (Рис. 2.21)

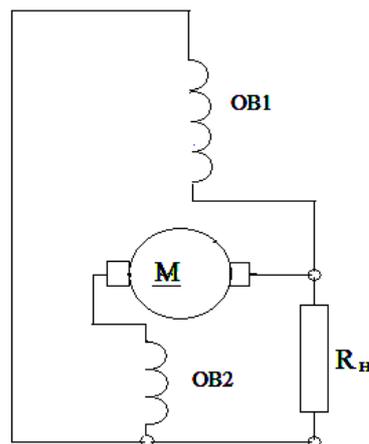


Рисунок 2.21 Электрическая схема компаундного генератора

## 2.10 Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Типовая схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рисунке 2.22

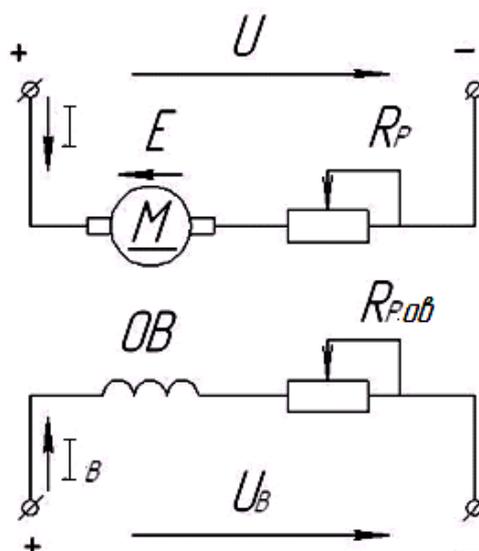


Рисунок 2.22 Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Якорь двигателя  $M$  и его обмотка возбуждения ( $OB$ ) получают питание от разных, независимых друг от друга источников  $U$  и  $U_B$ , что позволяет отдельно регулировать напряжение на якоре двигателя и на обмотке возбуждения и выполнять их на разное номинальное напряжение.

Аналитически выражение механической характеристики двигателя можно получить из уравнения равновесия напряжений, составленного для якорной цепи этой схемы. При установившемся режиме работы двигателя приложенное напряжение  $U$  уравнивается падением напряжения в якорной цепи  $IR$  и наведённой в якорной цепи ЭДС  $E$ , т.е.

$$U = IR + E,$$

где  $I$  - ток в якорной цепи;

$R = R_p + R_{я}$  - суммарное сопротивление якорной цепи, включающее внешнее сопротивление реостата  $R_p$  и внутреннее сопротивление якоря двигателя  $R_{я}$  (при наличии дополнительных полюсов учитывается и их сопротивление).

$$E = C_E \Phi \omega, \quad \omega = \frac{\pi n}{30}$$

Отсюда, если подставить в предыдущее уравнение значение  $E$  и решить относительно  $I$ , получим

$$I = \frac{U}{R} - \frac{C_E \Phi}{R} \omega.$$

Данную зависимость  $I = f(\omega)$  называют электромеханической или скоростной характеристикой двигателя.

Для скоростной характеристики может быть приведена следующая зависимость

$$\omega = \frac{U - IR}{C_E \Phi}.$$

Для получения уравнения механической характеристики необходимо найти зависимость момента двигателя от скорости. Это можно сделать, если учесть что момент, развиваемый двигателем

$$M = C_M \Phi I,$$

тогда:

$$\omega = \frac{U}{C_E \Phi} - M \frac{R}{C_E C_M \Phi^2}$$

Механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения при неизменных параметрах  $U, \Phi$  и  $R$  представляется прямой линией (Рис. 2.23).

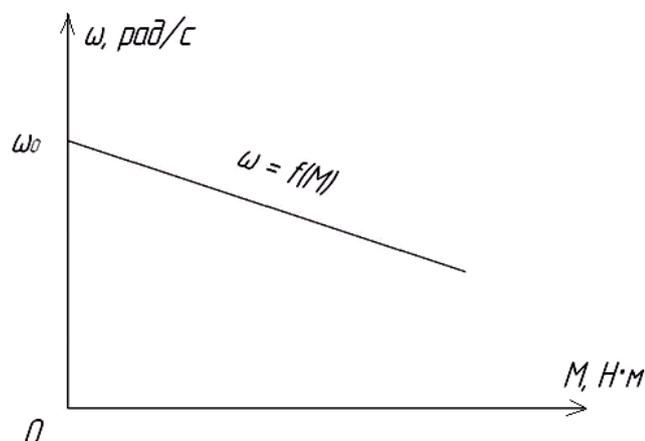


Рисунок 2.23 Механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока можно получить за счёт изменения напряжения питающей сети  $U$ , магнитного потока возбуждения  $\Phi$  и введения добавочного резистора (реостата  $R_d$ ) в цепь якоря двигателя.

Рассмотрим влияние  $U$ ,  $\Phi$ ,  $R_d$  на механическую характеристику двигателя.

Введение добавочного сопротивления в цепь якоря двигателя. На рисунке 2.24 представлены механические характеристики ДПТ независимого возбуждения для различных сопротивлений якорной цепи (реостатное регулирование).

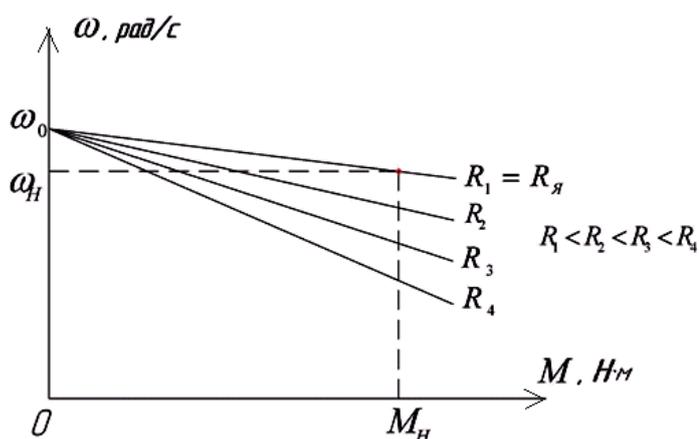


Рисунок 2.24 Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения при реостатном регулировании

Из выражения для механической характеристики видно, что при  $M=0$ , все характеристики проходят через одну точку, лежащую на оси абсцисс. Угловая скорость в этой точке имеет вполне определённое значение, не зависящее от сопротивления якорной цепи. Эта скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  и определяется выражением:

$$\omega_0 = \frac{U}{C_E \Phi}.$$

Падение скорости  $\Delta\omega$  при постоянном значении тока или момента и неизменном магнитном потоке  $\Phi$  пропорционально сопротивлению якорной цепи, т.е. жесткость механической характеристики двигателя уменьшается пропорционально увеличению сопротивления. Введение добавочного сопротивления в якорную цепь используется для регулирования скорости вращения двигателя и ограничения пусковых токов и моментов.

Изменение напряжения питающей сети. Из уравнения механической характеристики двигателя следует, что при изменении напряжения, приложенного к якорной цепи двигателя, пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода.

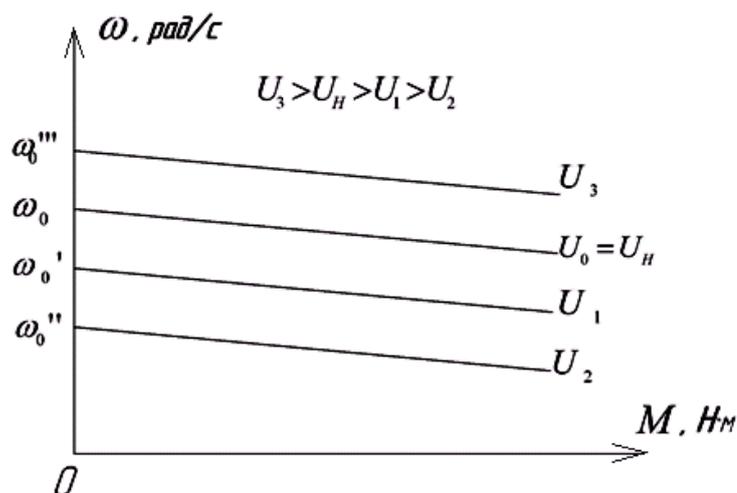


Рисунок 2.25 Механические характеристики ДПТ при изменении напряжения питающей сети

Характеристики двигателя при различных напряжениях будут параллельны. Семейство таких характеристик показано на рисунке 2.25

Изменение магнитного потока возбуждения двигателя. Анализ уравнения механической характеристики показывает, что изменение магнитного потока двигателя оказывает влияние как на первое, так и на второе слагаемое, т.е. на изменение скорости идеального холостого хода и жесткость механической характеристики. Искусственные механические характеристики двигателя, соответствующие различным величинам магнитного потока возбуждения, представлены на рисунке 2.26

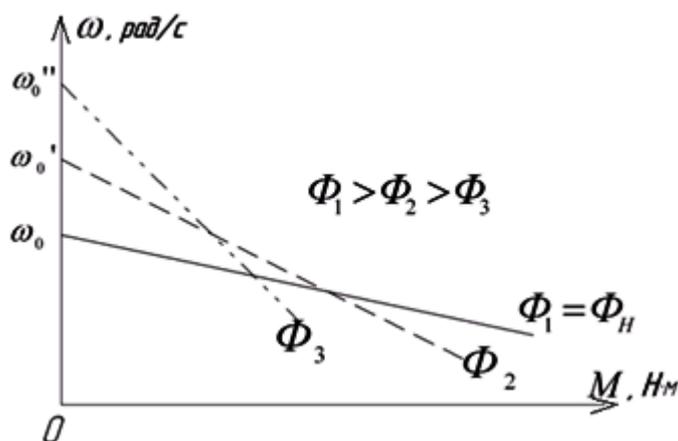


Рисунок 2.26 Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения при изменении величины магнитного потока

## 2.11 Построение механических характеристик двигателя независимого возбуждения по каталожным данным.

В каталоге (паспорте) для двигателя постоянного тока обычно приводятся следующие данные:  $U_H, I_H, P_H, n_H, \eta_H$ . Для построения механической характеристики двигателя независимого возбуждения, естественной или искусственной, достаточно знать лишь координаты двух точек, поскольку все механические характеристики теоретически представляют собой прямые линии. Эти две точки для каждой характеристики могут быть любыми, однако построение естественной механической характеристики удобно производить по точкам, одна из которых соответствует номинальному моменту двигателя и номинальной скорости ( $M = M_H, \omega = \omega_H$ ), а другая – скорости идеального холостого хода ( $M = 0, \omega = \omega_0$ ). Определим координаты данных точек, используя каталожные данные двигателя.

Номинальный момент двигателя вычисляется по формуле

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$$

Номинальная угловая скорость двигателя  $\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30}$  [рад/с], где  $n_H$  - номинальная скорость [об/мин].

Скорость идеального холостого хода можно определить из выражения механической характеристики при  $M=0$ , т.е.

$$\omega_0 = \frac{U_H}{C_E \Phi_H}$$

Величину  $C_E \Phi_H$  можно вычислить, воспользовавшись выражением:

$$C_E \Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{\text{я}}}{\omega_H}$$

Так как в каталогах внутреннее сопротивление якоря  $R_{\text{я}}$  обычно не указывается, то его ориентировочно определяют, приняв, что половина всех потерь в двигателе связаны с потерями в меди якоря. Поэтому  $I_H^2 R_{\text{я}} \approx 0,5(1 - \eta_H)$ . Отсюда

$$R_{\text{я}} \approx 0,5 R_H (1 - \eta_H),$$

где  $R_H = \frac{U_H}{I_H}$  – номинальное сопротивление якорной цепи двигателя.

Номинальным сопротивлением двигателя постоянного тока называется такое сопротивление, которое при неподвижном якоре и

номинальном напряжении сети ограничивает ток в якоре до номинальной величины.

После вычисления координат двух точек можно построить естественную механическую характеристику (Рис. 2.27).

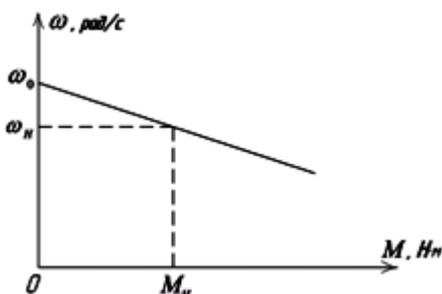


Рисунок 2.27 Построение механической характеристики ДПТ независимого возбуждения по каталожным данным

В расчётных работах иногда приходится вместо угловой скорости  $\omega$  [рад/с], пользоваться внесистемной величиной для обозначения скорости вращения  $n$  [об/мин], которая находится в каталожных данных электрических машин.

Основные уравнения при использовании  $n$  об/мин записывается следующим образом:

- 1) Уравнение для скоростной характеристики:  $n = \frac{U - IR}{K_E \Phi}$ , об/мин;
- 2) Уравнение для механической характеристики:

$$n = \frac{U}{K_E} - M \frac{R}{K_E K_M \Phi^2}.$$

## 2.12 Механическая характеристика двигателей постоянного тока независимого возбуждения в тормозных режимах

Выше была рассмотрена работа электрической машины постоянного тока независимого возбуждения в двигательном режиме. Однако этим не исчерпываются возможные режимы работы электрической машины.

Электрические машины обладают замечательными свойствами обратимости, они могут работать как в двигательном так и в тормозном режимах. Под тормозным режимом понимают такой режим работы машины, при котором создаваемое им моменты

противодействуют движению рабочего механизма. В общем случае тормозные моменты в современных электроприводах используются для быстрой и точной остановки механизма или изменения направления его движения. Быстрота и точность, с какой будут проделаны эти операции, во многих случаях определяют производительность механизма, а иногда и качество вырабатываемого продукта.

Известны три возможных способа электрического торможения, а именно: торможение с отдачей энергии в сеть (рекуперативное); динамическое торможение; торможение противовключением. Каждый тормозной режим является генераторным, т.е. кинетическая энергия поступает в машину с вала, преобразуется в электрическую и либо отдается в сеть, либо затрачивается на нагрев элементов якорной цепи, обладающих сопротивлением, и рассеивается в окружающую среду. Рассмотрим особенности механических характеристик при указанных способах торможения.

**Рекуперативное торможение** возникает во всех случаях, когда скорость вращения двигателя  $\omega$  оказывается выше скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . При этом  $E = C_E \Phi \omega > U$ , ( $\omega > \omega_0$ ), т.е. ЭДС двигателя становится больше напряжения  $U$  источника питания и ток якоря меняет свое направление. Последнее очевидно из равенства:

$$I = \frac{U - E}{R} = -\frac{E - U}{R} < 0.$$

Отрицательное значение тока свидетельствует о том, что двигатель работает генератором параллельно с питающей сетью, создавая при этом тормозной момент на своем валу:

$$M = -C_M \Phi I.$$

Рекуперативное торможение очень экономично, поскольку механическая энергия, поступающая на вал двигателя, за вычетом потерь, отдается в сеть.

Поскольку режим рекуперации возникает без изменения схемы включения двигателя, для данного режима остаются справедливыми уравнения электромеханической и механические характеристики выведенные ранее. Следовательно, механические характеристики в режиме рекуперации являются продолжением характеристик двигательного режима.

Этот способ торможения возможен, например, в приводах транспортных и подъемных механизмов при спуске груза и

некоторых способах регулирования скорости (тепловые двигатели после ремонта), когда двигатель, переходя к низким скоростям, проходит значение ( $\omega > \omega_0$ ). Но торможение этим способом может быть осуществлено в ограниченных пределах, т.к. не во всех приводах возможно соблюдения условия  $\omega > \omega_0$ .

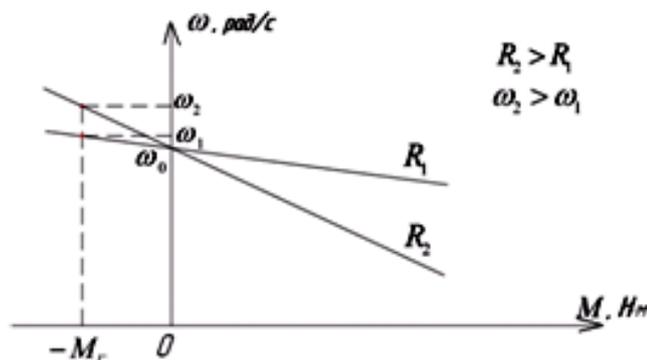


Рисунок 2.28 Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения в режиме рекуперативного торможения (второй квадрат).

Необходимо отметить, что чем больше сопротивление в якорной цепи двигателя, тем выше его скорость вращения при одном и том же тормозном моменте  $\omega_2 > \omega_1$  (рисунок 2.28).

**Динамическое торможение** осуществляется при отключении якоря от сети и замыкании его на резистор  $R_p$  (рисунок 2.29), поэтому иногда его называют реостатным. Обмотка возбуждения при этом остается подключённой к источнику питания. При динамическом торможении электрическая машина преобразует механическую энергию рабочей машины в электрическую. Однако эта энергия не отдаётся в сеть, а выделяется в виде теплоты на сопротивлениях в цепи якоря и резисторе  $R_p$ .

Так как при включении по схеме динамического торможения направление вращения и направление магнитного потока электрической машины не изменяется, то ЭДС машины в этом режиме сохраняет тот знак, что и в двигательном режиме, а т.к. напряжение извне к якорю не прикладывается, тогда ток якоря определяется по формуле:

$$I = -\frac{E}{R} = -\frac{C_E \Phi}{R} \omega \quad \text{и} \quad M = -\frac{C_E C_M \Phi^2}{R} \omega$$

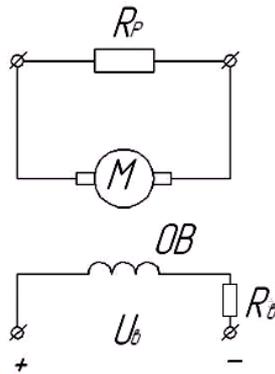


Рисунок 2.29 Схема динамического торможения ДПТ независимого возбуждения

Полученные зависимости представляют собой уравнения скоростной и механической характеристик двигателя в режиме динамического торможения. При  $\Phi = \text{const}$  эти характеристики прямолинейны и проходят через начало координат во втором и четвертом квадрантах. Наклон характеристик определяется величиной сопротивления  $R_p$  (Рис. 2.30).

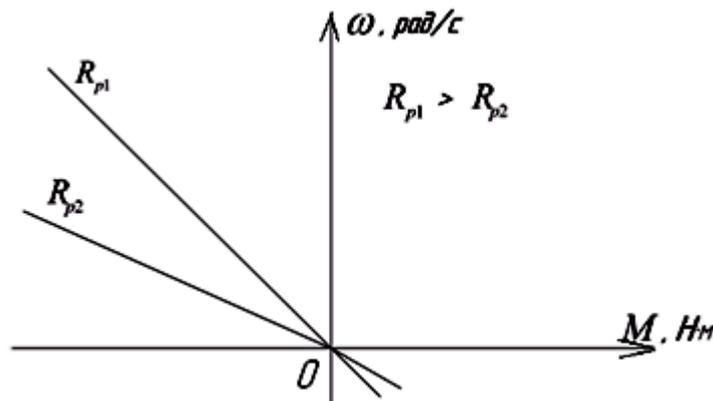


Рисунок 2.30 Механические характеристики машины постоянного тока независимого возбуждения при динамическом торможении

Динамическое торможение широко используется для остановки привода при отключении от сети, при спуске грузов в подъемных машинах. Оно достаточно экономно, хотя и уступает в этом отношении торможению с отдачей энергии в сеть.

Как видно из рисунка, жесткость характеристик уменьшается с увеличением сопротивления якорной цепи.

Торможение противовключением осуществляется в том случае, когда обмотки якоря двигателя включены для одного направления

вращения, а якорь двигателя под воздействием внешнего момента или сил инерции вращается в противоположном направлении. Получение режима противовключения можно представить следующим образом. Пусть двигатель, например, подъёмной установки, работая на искусственной характеристике в двигательном режиме (в цепь якоря введено добавочное сопротивление  $R_p$ ), поднимает груз, создающий момент сопротивления  $M_{c1}$ . Согласно характеристике (Рис. 2.31), этому моменту сопротивления соответствует скорость  $\omega_1$ .

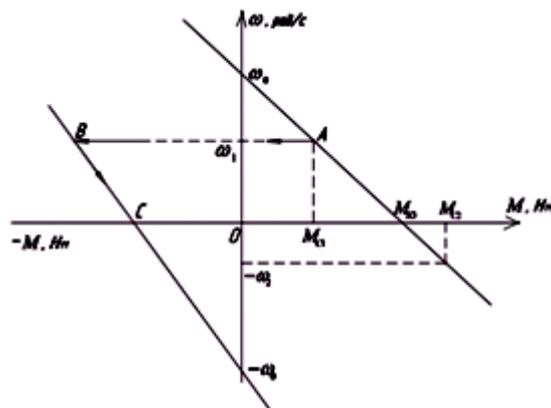


Рисунок 2.31 Механическая характеристика машины постоянного тока независимого возбуждения при торможении противовключением

Ток якоря в этом случае определяется выражением:  $I = \frac{U-E}{R}$ . При увеличении нагрузки ( $M_c$ ) скорость двигателя будет уменьшаться. Когда момент сопротивления достигнет величины  $M_{кз}$ , двигатель остановится. Дальнейшее увеличение нагрузки приведёт к изменению направления вращения. Груз начнёт опускаться, хотя двигатель включён на подъём. Это и будет режим противовключения. Скорость опускания груза зависит от нагрузки и величины добавочного сопротивления в цепи якоря. Для показанной характеристики (Рис. 2.31) моменту  $M_{c2}$  соответствует установившаяся скорость  $-\omega_2$ .

Изменение знака скорости в режиме противовключения приводит к изменению знака ЭДС двигателя, т.к. направления магнитного потока осталось неизменным. В этом случае формула для определения тока запишется следующим образом

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

В режиме противовключения двигатель работает генератором последовательно с сетью. Энергия, забираемая из сети, и энергия, подводимая со стороны рабочей машины, рассеиваются в виде тепла на сопротивлениях якорной цепи. С энергетической точки зрения этот режим крайне неэкономичен.

Режим противовключением можно получить так же за счёт переключения вращающегося двигателя на противоположное направление вращения с одновременным увеличением сопротивления якорной цепи. При этом двигатель, работающий до переключения с нагрузкой и скоростью, соответствующими точке А (Рис. 2.31), в первый момент из-за механической инерции не изменит направления и величины скорости. Однако, направление тока якоря, а значит и момента двигателя меняет знак. Следовательно, будет иметь место тормозной режим противовключения. На рисунке 2.31 ему соответствует точка В на характеристике. Под действием тормозного момента скорость двигателя уменьшится до нулевого значения. При скорости, равной нулю (точка С), двигатель должен быть отключён от сети. В противном случае начнётся его разгон в обратном направлении до скорости, определяемой нагрузочной и жесткостью механической характеристики. На участке характеристики от точки В до точки С соответствующему режиму противовключения, величина тока определяется выражением

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

Поскольку якорь теперь вращается в другую сторону, а направление магнитного потока не изменилось, ЭДС двигателя изменит направление на обратное, ток якоря будет определяться суммой приложенного напряжения и ЭДС двигателя. Величина тока будет значительно больше, чем в двигательном режиме. В связи с этим для уменьшения броска тока до допустимой величины в якорную цепь двигателя должно быть введено достаточно большое сопротивление.

Торможение противовключением целесообразно применять для реверсированных приводов, где и быстрое торможение, и пуск двигателя в обратном направлении необходимы по технологическим условиям. При этом достигается выигрыш во времени торможения и изменении направления вращения.

На практике для нереверсивных приводов чаще применяется динамическое торможение, т.к. оно осуществляется по более простой схеме.

Для обеспечения быстроты торможения и требуемой точности остановки практически чаще всего применяется динамическое торможение или торможение противовключением.

Изменение направления вращения двигателя, чтобы получить режим противовключения, может быть осуществлено двояко: переключением либо обмотки якоря, либо обмотки возбуждения. Однако переключение обмотки возбуждения практикуется реже, т.к. вследствие значительной ее индуктивности время торможения возрастает в сравнении со случаем, когда переключается обмотка якоря.

### 2.13 Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для двигателя последовательного возбуждения (Рис. 2.32) уравнение скоростной характеристики имеет такой же вид, как и у двигателя параллельного возбуждения

$$\omega = \frac{U - IR}{C_E \Phi}, \quad (1)$$

где  $R$  – суммарное сопротивление якорной цепи, состоящее из сопротивления обмотки якоря, обмотки возбуждения и сопротивления реостата  $R_p$ .

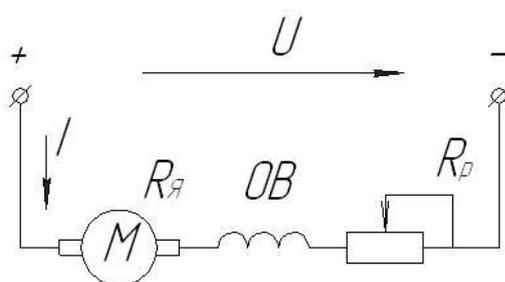


Рисунок 2.32 Схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

В отличие от двигателя параллельного возбуждения здесь магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый обмоткой возбуждения, является функцией тока якоря  $I$ . Эта зависимость (кривая намагничивания) изображена на рисунке 2.33

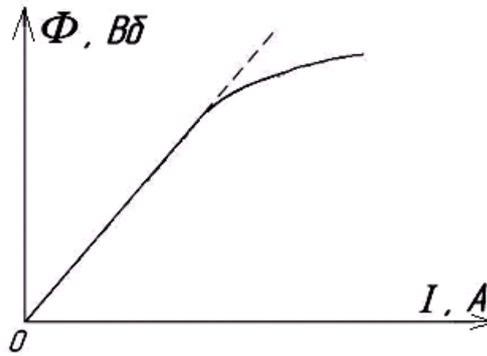


Рисунок 2.33 Кривая намагничивания двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Так как нет точного аналитического выражения для кривой намагничивания магнитопроводов машины, то трудно дать и точное аналитическое выражение для механической характеристики двигателя последовательного возбуждения.

Если для упрощения анализа предположить, пренебрегая насыщением магнитной системы, линейную зависимость между потоком и током якоря, как это показано пунктиром, т.е. считать

$$\Phi = \alpha \cdot I,$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

В этом случае электромагнитный момент двигателя:

$$M = C_M \Phi I = C_M \alpha \cdot I^2, \quad (2)$$

Поставив в (1), значение  $I$  через (2), получим выражение механической характеристики

$$\omega = \frac{U}{\alpha \cdot C_E \sqrt{\frac{M}{\alpha \cdot C_E}}} - \frac{R}{\alpha \cdot C_E} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B, \quad (3)$$

где  $A = \frac{U}{\sqrt{\alpha \cdot C_E}}, \quad B = \frac{R}{\alpha \cdot C_E}.$

Механическая характеристика изображается кривой, для которой ось ординат является асимптотой. Особенность механической характеристики двигателя последовательного возбуждения является её большая крутизна в области малых значений момента (Рис. 2.34).

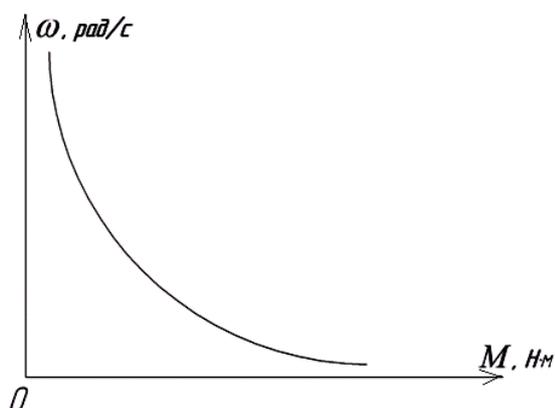


Рисунок 2.34 Механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения при линейной зависимости магнитного потока и тока якоря

Уравнение (3) дает лишь общее представление о механической характеристике двигателя последовательного возбуждения. При расчётах ими пользоваться нельзя, так как в современной практике машины работают при насыщенной магнитной системе.

Построение характеристик двигателя приходится вести по этой причине графоаналитическим способом. Обычно в каталогах машин заводом изготовителем приводятся естественные характеристики

$$n = f(I) \text{ и } M = f(I)$$

Для серии двигателей определённого типа эти характеристики могут быть даны в относительных единицах (Рис. 2.35)

$$v = f(i) \text{ и } \mu = f(i), \text{ где } v = \frac{n}{n_H}; \mu = \frac{M}{M_H}; i = \frac{I}{I_H}.$$

Для построения искусственных (реостатных) характеристик можно воспользоваться следующим методом.

Уравнение естественной характеристики

$$\omega_e = \frac{U - IR_d}{C_d \Phi}, \text{ где } R_d = R_b + R_a \text{ или } \omega_e = \frac{U}{C_E \Phi} \left(1 - \frac{IR_d}{U}\right).$$

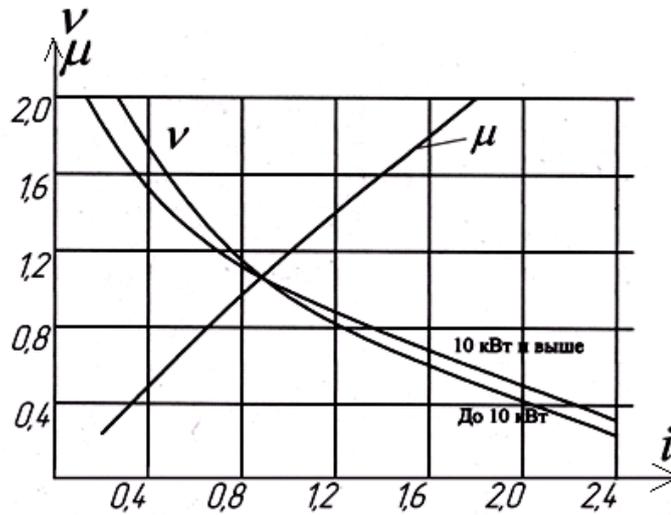


Рисунок 2.35 Зависимость момента и скорости от тока якоря двигателя последовательного возбуждения серии 2ПО

В случае включения в якорную цепь дополнительного сопротивления  $R_p$

$$\omega = \frac{U}{C_E \Phi} \left(1 - \frac{I(R_D + R_p)}{U}\right).$$

При делении:

$$\frac{\omega}{\omega_e} = \frac{U - I(R_D + R_p)}{U - IR_D},$$

отсюда:

$$\omega = \omega_e \frac{U - I(R_D + R_p)}{U - IR_D},$$

$$\text{или в относительных единицах: } v = v_e \frac{1-ir}{1-ir_d}, \quad (5)$$

$$\text{где } r_d = \frac{R_D}{R_H}; \quad r = \frac{R_D + R_p}{R_H}; \quad v_e = \frac{n_e}{n_H}.$$

Порядок построения реостатной характеристики сводится к тому, что задаваясь соответствующими значениями тока  $I$ , по имеющейся естественной характеристике находится  $v_e$ , затем по формуле (5) при определённом  $r = r_1$  (для которого строится реостатная характеристика), и токе  $i_1$  определяется искомое значение  $v_1$ .

Таким же образом для значений  $i_1$  определяются искомые величины скоростей  $v_2, v_3$  и т.д.

Пользуясь кривой  $\mu = f(i)$  и скоростными характеристиками (Рис. 2.36), можно построить по точкам  $v = f(\mu)$ , то есть механические характеристики двигателя.

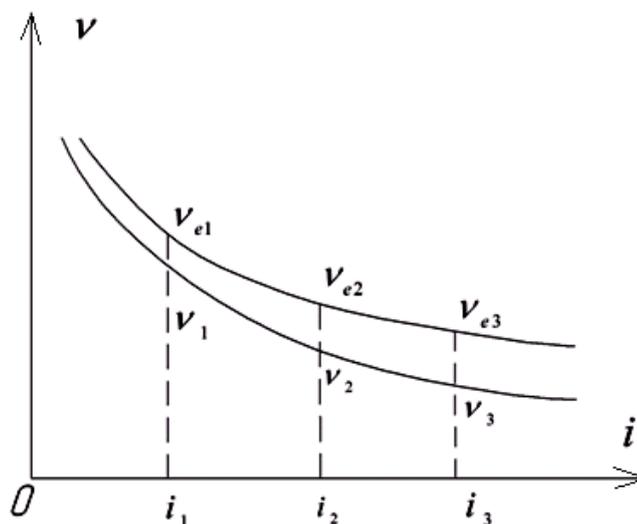


Рисунок 2.36 Скоростные характеристики (в относительных единицах) ДПТ последовательного возбуждения

На рисунке 2.37 приведены естественная и искусственные механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, построенные в относительных единицах. С увеличением сопротивления скорость двигателя уменьшается и характеристика смещается вниз.

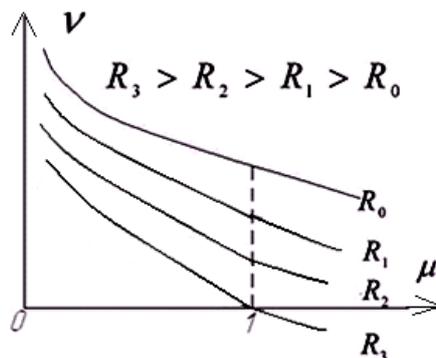


Рисунок 2.37 Механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения в относительных единицах

Особенностью механических характеристик рассматриваемого двигателя является невозможность получения режима идеального холостого хода.

При нагрузке ниже 15-20% номинальной работа двигателя на естественной характеристике практически недопустима из-за чрезмерного увеличения скорости вращения якоря.

Расчёт сопротивления для пуска двигателей последовательного возбуждения может быть произведён следующим графоаналитическим методом, не требующим самих реостатных характеристик двигателя.

Воспользуемся естественной характеристикой двигателя  $\omega = f(I)$  (Рис. 2.38).

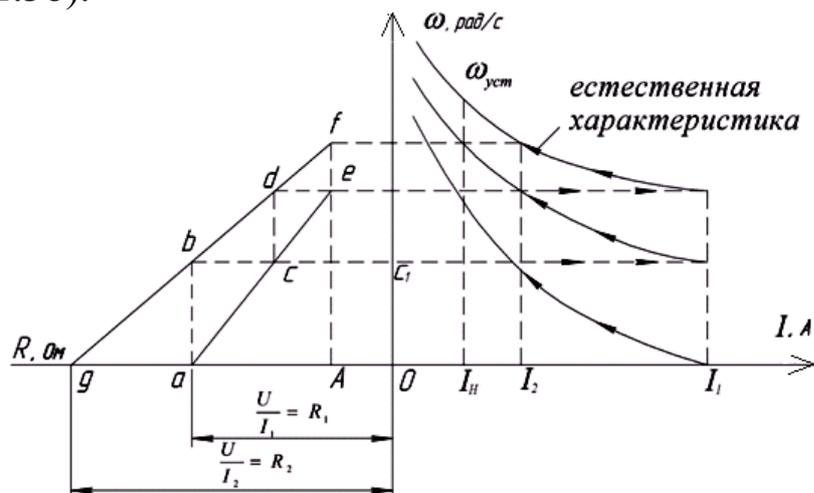


Рисунок 2.38 Графоаналитический метод расчёта пусковых сопротивлений ДПТ последовательного возбуждения

Отметим на ней точки допустимых токов при переключении с одной ступени реостата на другую  $I_1$  и  $I_2$  проведём через эти точки пунктиром две параллельные линии до пересечения с вертикалью Af в точках f и e.

Вертикаль Af расположена слева от начала координат на расстоянии OA, соответствующем внутреннему сопротивлению двигателя.

Откладываем в том же масштабе отрезки  $Oa = R_1 = \frac{U}{I_1}$  и  $Og = R_2 = \frac{U}{I_2}$ .

Соединяя точки ae и gf получаем две прямые, характеризующие линейную зависимость между скоростью вращения двигателя и сопротивлением его якорной цепи при неизменном токе якоря. Последнее вытекает из выражения:

$$\omega = \frac{U - IR}{C_E \Phi}$$

Для определения числа пусковых ступеней и величины их сопротивлений поступают следующим образом. Проводят вертикаль через точку  $a$  до пересечения с  $gf$  в точке  $b$ . Затем через точку  $b$  проводят линию, параллельную оси абсцисс, до точки  $c$  на  $ae$ .

Аналогично проводятся линии  $cd$  и  $ef$ . Построение считается удачным, если последняя горизонталь проходит через точку  $e$ . Если этого не произойдёт, то построение следует повторить, изменив наклон одной из прямых  $ae$  или  $gf$  за счёт выбора новых значений  $I_1$  и  $I_2$  (чаще меняют только  $I_2$ ).

На рисунке 2.38 дано построение с числом ступеней реостата, равным двум.

Из построения ясно, что отрезок  $bc$  соответствует сопротивлению первой ступени реостата, а  $de$  – второй. В момент пуска ( $\omega = 0$ ) ток в якоре будет равен  $I_1$ , и сопротивление всей якорной цепи  $R_1 = \frac{U}{I_1}$ . При разгоне двигателя до скорости  $\omega_1$  ток снижается, а величина сопротивления якорной цепи не изменится. В точке  $b$  сопротивление то же, но ток равен  $I_2$ . Затем при  $\omega = \omega_1$  происходит шунтирование первой ступени, общее сопротивление якорной цепи становится соответствующему отрезку  $CC_1$ , а ток вновь достигает значения  $I_1$  и т.д., пока двигатель не начнёт работать на естественной характеристике.

## **2.14 Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения в тормозных режимах**

Для двигателя последовательного возбуждения возможны два тормозных режима: режим противовключения и режим динамического торможения. Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть для этих двигателей осуществить невозможно, т.к. ЭДС якоря не может быть больше приложенного напряжения сети.

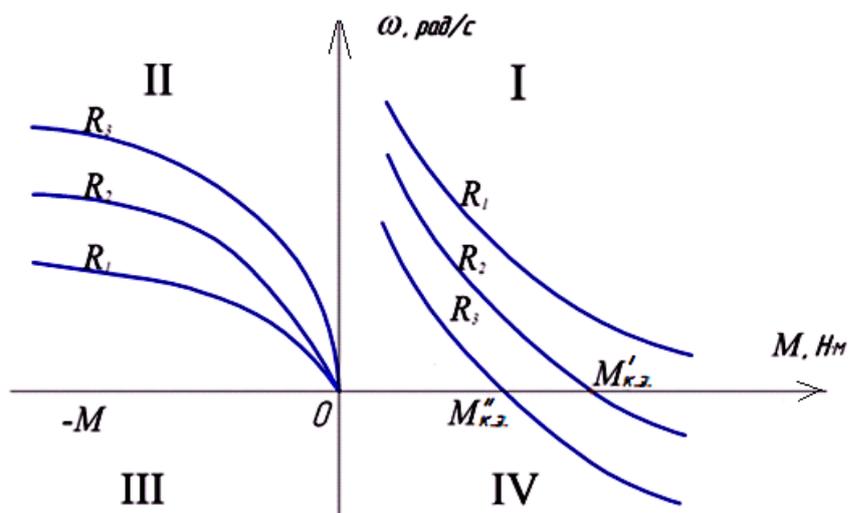


Рисунок 2.39 Механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения в тормозных режимах

При работе двигателя в режиме противовключения в его цепь для ограничения тока вводится дополнительное сопротивление.

Механические характеристики для этого режима являются продолжением характеристик двигательного режима в область отрицательных скоростей. Это иллюстрируется характеристиками, которые проходят в квадрантах I и IV (Рис. 2.39).

Работа двигателя в режиме противовключения возможна, если движущий момент нагрузки становится больше момента короткого замыкания  $M_{к.з.}$ . Нагрузка двигателя при противовключении должна быть ограничена в связи с необходимостью обеспечения допустимого тока в якорной цепи.

Так же как и в случае двигателя параллельного возбуждения, здесь возможен режим противовключения при изменении полярности напряжения, подводимого к якорю. В этом случае следует, изменив направление тока якоря, оставить без изменения направление тока в обмотке возбуждения.

Динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения может быть осуществлено двумя способами: с самовозбуждением и при независимом возбуждении.

При торможении с самовозбуждением якорь и обмотка возбуждения двигателя отключаются от сети и замыкается на сопротивление  $R_p$  (Рис. 2.40).

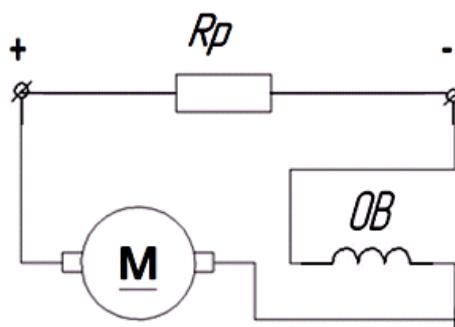


Рисунок 2.40 Схема реализации динамического торможения с самовозбуждением ДПТ последовательного возбуждения

Следует отметить, что при переводе машины из двигательного режима в режим динамического торможения необходимо переключить полярность якоря или обмотки возбуждения во избежание размагничивания машины.

В этом случае машина самовозбуждается при данном сопротивлении цепи якоря лишь при определённых значениях скорости, возбуждись, она создает тормозной момент. Практически тормозной момент возникает и при скоростях, близких к нулю, вследствие наличия остаточного магнетизма, но при низких скоростях тормозной момент весьма мал.

Механические характеристики машины для этого случая приведены в квадранте II, рисунок 2.39.

При этом способе торможения может вначале происходить интенсивное самовозбуждение, которое приводит к значительному скачку тормозного момента. Последний при сравнительно больших маховых массах механизма может вызвать нежелательные удары в механизме.

Поэтому чаще применяется динамическое торможение двигателя последовательного возбуждения по следующей схеме (Рис. 2.41):

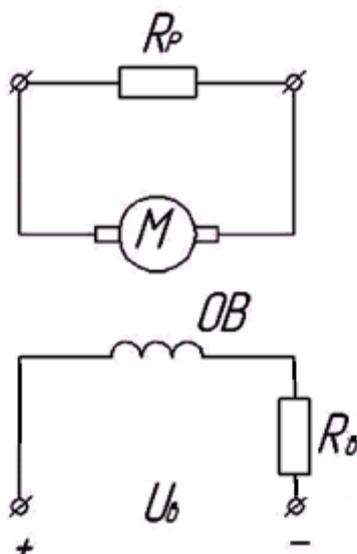


Рисунок 2.41 Схема реализации динамического торможения ДПТ последовательного возбуждения

Здесь машина работает в режиме генератора с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения подключается к сети через сопротивление ( $R_B$ ), ограничивающее ток до номинальной величины.

Характеристики подобны характеристикам двигателя постоянного тока параллельного возбуждения при динамическом торможении.

Иногда для двигателей малой мощности (до 0,52 кВт) отказываются от включения последовательной обмотки в сеть, поддержание потока осуществляют короткозамкнутыми медными кольцами на полюсах.

### 2.15 Потери энергии и КПД машин постоянного тока.

МПТ можно рассматривать, в плане преобразования энергии, по аналогии с синхронной машиной с неподвижным якорем.

В установившемся генераторном режиме механическая мощность  $P_2 = M_2 \Omega$  подведенная к машине, передается к активной зоне якоря через его механически напряженные вращающиеся элементы.  $M_2$  – вращающий момент приводного двигателя направленный в сторону вращения. Плотность потока механической мощности, передаваемой через эти элементы определяется  $P_{\text{мех}} = M \cdot \Omega$ . Часть мощности, подводимой к валу, расходуется на механические потери  $P_T$ , магнитные в зубцах и ярме  $P_M$  магнитопровода плюс к этому добавочные потери.

$$P_{\text{мех}} = P_2 - P_T - P_M - P_{\text{доб}}.$$

Соответственно и электромагнитный момент  $M$  действующий на якорь, уменьшается по сравнению с моментом  $M_2$  приложенным к валу.

$$M = M_2 - (P_T + P_M + P_D)/\Omega$$

Перечисленные потери имеют ту же природу, что и в синхронных машинах.

$P_T$  - для определения этих потерь нужно учитывать потери на трение в щеточно-коллекторном узле.  $P_M$ - (в синхронных машинах эти потери входят в электромагнитную мощность) определяют магнитные потери, появляющиеся в связи с тем, что в обращенном пополнении часть механической мощности поступающей на якорь преобразуется непосредственно в магнитные потери, выделяемые в виде тепла в зубцах и ярме магнитопровода якоря. Основные магнитные потери  $P_M$  рассчитываются по полному полю. К добавочным потерям  $P_D$  относятся: потери в наконечниках полюсов из-за пульсации поля, связанной с зубчатостью якоря; увеличение магнитных потерь при нагрузке из-за искажения поля вызванного поперечным МДС якоря; потери в проводниках якоря от радиальных составляющих переменных магнитных полей; добавочные потери в коммутируемых секциях от вихревых токов, индуцируемых изменяющимися полями рассеяния.

В активной зоне якоря (то есть в области, занятой зубцами магнитопровода и проводниками обмотки якоря) механическая мощность  $P_{\text{мех}}$  преобразуется в электромагнитную мощность, поступающая в активную зону якоря в виде потока вектора Пойтинга,  $P_{\text{эм}} = M \cdot \Omega$ .

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} = M \cdot \Omega = C_E I_{\text{я}} \Phi \Omega = E \cdot I_{\text{я}}$$

Электромагнитная мощность  $P_{\text{я}}$ , снимается со щеток якоря, меньше электромагнитной мощности на электрические потери  $P_{\text{э}}$  в цепи якоря:

$$P_{\text{я}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{э}}, \text{ где } P_{\text{э}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2, \text{ тогда}$$

$$P_{\text{я}} = (\vartheta + R_{\text{я}} I_{\text{я}}) I_{\text{я}} - R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = \vartheta \cdot I_{\text{я}}.$$

В генераторе на питание обмотки независимого или параллельного возбуждения расходуется мощность  $P_{\text{в}} = R_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}^2$ , тогда полезная электромагнитная мощность в генераторном режиме  $P = P_{\text{я}} - P_{\text{в}}$ .

В генераторе параллельного возбуждения  $P_B = \vartheta \cdot I_B$  ( $R_B \cdot I_B = \vartheta$ ), следовательно  $P = \vartheta \cdot I_{\text{я}} - \vartheta \cdot I_B = \vartheta(I_{\text{я}} - I_B) = \vartheta \cdot I$ , где  $I$  – ток на выводах машины.

В конечном счете полезная электромагнитная мощность  $P$  в режиме генератора меньше механической мощности  $P_2$  подведенной к валу, на потери в машине  $\sum P$ .

$$P = P_2 - \sum P, \text{ где}$$

$$\sum P = P_{\text{т}} + P_{\text{м}} + P_{\text{д}} + P_{\text{э}} + P_{\text{в}}$$

В режиме двигателя  $\vartheta > E$ ,  $I_{\text{я}} < 0$ , в связи с этим  $P_2$ ,  $P_{\text{мех}}$ ,  $P_{\text{эм}}$ , и  $P$  получается отрицательными, причем  $|P_2| < P$  – электрической мощности потребляемой из сети на  $\sum P$ .

$$|P_2| = |P| - \sum P.$$

КПД в режиме генератора:

$$\eta = \frac{P}{P_2} = 1 - \frac{\sum P}{P + \sum P}$$

КПД в режиме двигателя

$$\eta = \frac{|P_2|}{|P|} = 1 - \frac{\sum P}{|P_2| + \sum P}$$

В МПТ электрические потери в обмотке якоря составляют примерно 50% всех потерь в номинальном режиме. Магнитные потери в якоре вследствие перемагничивания при вращении составляют  $1 \div 3\%$   $P_{\text{ном}}$ , механические потери составляют  $1 \div 2\%$   $P_{\text{ном}}$ , потери в обмотке возбуждения составляют  $0,5 \div 7\%$   $P_{\text{ном}}$ . КПД МПТ имеет следующий вид (Рис. 2.42).

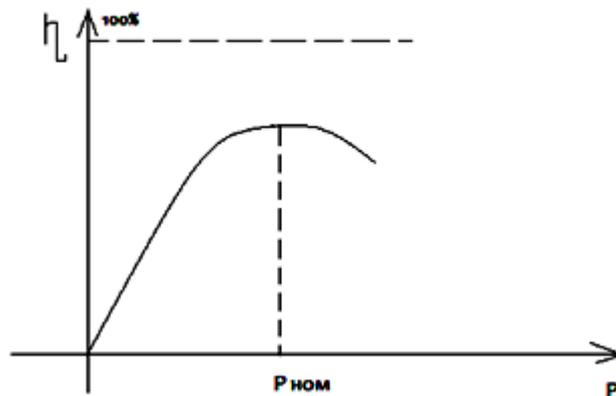


Рисунок 2.42 КПД МПТ в зависимости от развиваемой мощности

## 2.16 Характеристики генераторов постоянного тока.

Свойства ненагруженного генератора постоянного тока ( $I_{\text{я}} = 0$ ) описывает характеристика холостого хода. О свойствах генератора при нагрузке судят по характеристикам: внешняя; регулировочная, нагрузочная и короткого замыкания. Эти характеристики устанавливают связь между основными величинами в электрических цепях генератора постоянного тока:  $\vartheta$ ;  $I_{\text{я}}$  - ток нагрузки;  $I_{\text{в}}$  - ток возбуждения. Так как генератор работает при постоянных оборотах, основные характеристики определяются при  $n = \text{const}$ .

Все характеристики генератора постоянного тока могут быть определены расчетным путем так и экспериментально.

## 2.17 Генератор независимого возбуждения.

Характеристика холостого хода (х.х.х.)  $\vartheta = f(I_{\text{в}})$  при  $I_{\text{я}} = 0$ . Характеристика снимается экспериментально увеличивая ток  $I_{\text{в}}$  от минимального значения до номинального. При  $I_{\text{в}} = 0$ , генератор развивает некоторое значение  $\vartheta_{\text{ост}} = 2 \div 3\% \vartheta_{\text{н}}$ , вследствие остаточного намагничивания полюсов и ярма индуктора (Рис. 2.43).

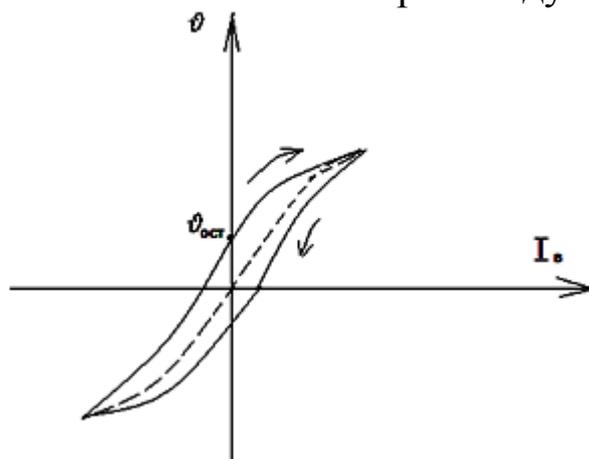


Рисунок 2.43 Характеристика холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения.

Внешняя характеристика. Это зависимость  $\vartheta = f(I_{\text{я}})$ , при  $I_{\text{в}} = \text{const}$ . На рисунке 2.44 приведена внешняя характеристика.

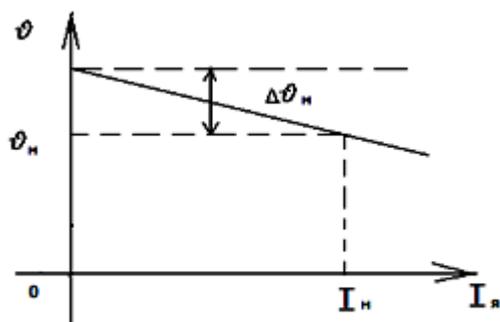


Рисунок 2.44 Внешняя характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения.

При увеличении тока  $I_{я}$  напряжение падает по двум причинам:

1. Вследствии падения напряжения в цепи якоря ( $I_{я}R_{я}$ ).
2. Уменьшение  $E_0$  ввиду уменьшения потока под действием поперечной реакции якоря.

В генераторе независимого возбуждения  $\Delta\vartheta_{н}\% = \frac{\Delta\vartheta_{н}}{\vartheta_{н}} \cdot 100\% = 5 \div 15\%$ .

Регулировочная характеристика, это зависимость  $I_{в} = f(I_{я})$  при  $\vartheta = const$ . Регулировочные характеристики показывают, как необходимо изменять ток возбуждения генератора, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не менялось (Рис. 2.45).

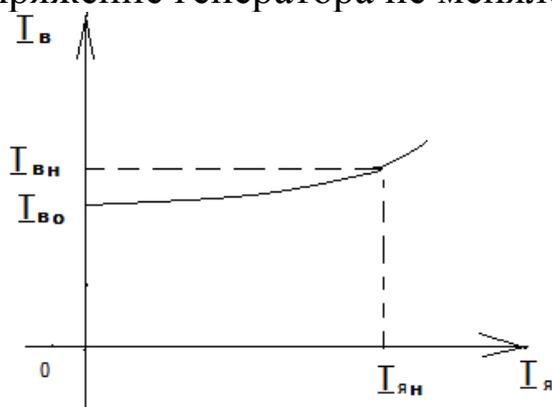


Рисунок 2.45 Регулировочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения.

С увеличением тока  $I_{я}$  необходимо увеличить  $I_{в}$ , чтобы компенсировать влияние падения напряжения  $I_{я}R_{я}$  и реакции якоря.

Генератор постоянного тока с параллельным или с параллельно последовательным возбуждением.

Генераторы этого типа не нуждаются в постороннем источнике постоянного тока для питания обмоток возбуждения и работают с самовозбуждением.

Характеристика холостого хода  $\vartheta = f(I_B)$ , при  $I_A = 0$  и  $n = const$  может быть снята только в одном квадранте путем регулирования  $I_B$  с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения. Так как  $I_B$  мало, то  $\vartheta \approx E_0$  и характеристика кривой х.х.х. у генератора с параллельным возбуждением будет таким же как и у генератора с независимым возбуждением (Рис. 2.46).

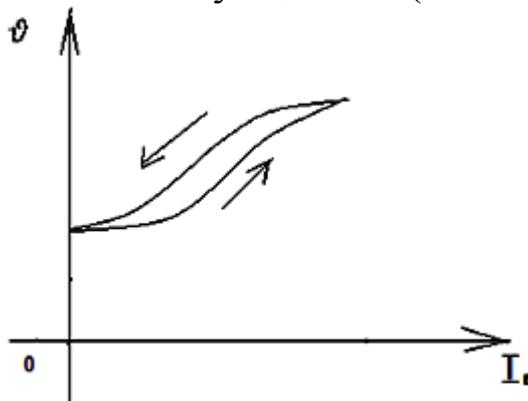


Рисунок 2.46 Характеристика холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

Номинальный ток в параллельной обмотке генератора весьма мал по сравнению с номинальным ходом в обмотке якоря:  $I_{BH} = 0,01 \div 0,05 I_{яH}$ . При анализе характеристик генератора считают, что ток нагрузки  $I = I_A - I_B \approx I_A$ .

Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения происходит при соблюдении следующих условий:

- 1) Наличие остаточного магнитного потока полюсов;
- 2) Правильное включение концов обмотки возбуждения или правильное направление вращения якоря;
- 3) Сопротивление цепи возбуждения при данной скорости вращения « $n$ » якоря должно быть ниже некоторого критического значения или скорость вращения при данном  $R_B$  должно быть выше некоторого критического значения.

Для самовозбуждения генератора достаточен остаточный поток 2 – 3% от номинальной величин. Практически такой остаточный поток всегда имеется в уже работавшей машине. Вновь изготовленную машину или машину, которая по каким-либо

причинам размагнитилась, необходимо намагнитить, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника.

При соблюдении необходимых условий процесс самовозбуждения протекает следующим образом. Небольшое значение ЭДС индуцируется в якоре остаточным магнитным потоком, вызывая в обмотке возбуждения малый ток. Этот ток  $I_B$  вызывает увеличение потока полюсов, а следовательно и увеличение ЭДС, которая в свою очередь обуславливает дальнейшее увеличение  $I_B$  и так далее. Лавинообразный процесс продолжается до тех пор пока не достигнет установившегося значения.

Если было проведено неправильное подключение обмоток возбуждения или направление вращения якоря неправильное, то возникший  $I_B$  обратного направления своим потоком ослабляет результирующий поток и уменьшает ЭДС.

Рассмотрим более подробнее процесс самовозбуждения при холостом ходе, когда цепь якоря разомкнута ( $R_H = \infty$ ). Предположим, что якорь генератора вращается с постоянной скоростью  $n$ . На рисунке 2.47 показана характеристика холостого хода и прямые 1-4  $\vartheta_B = I_B R_B$  при различных  $R_B$ .

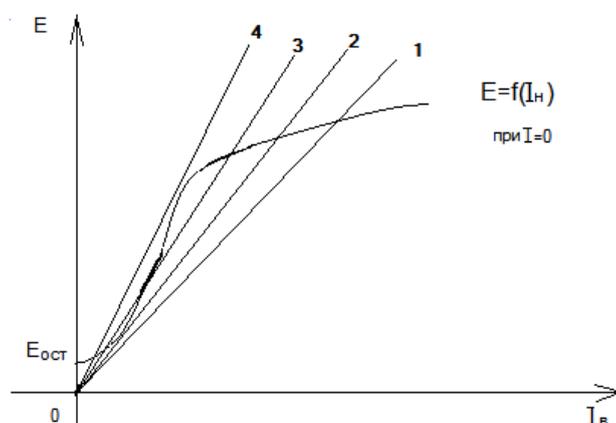


Рисунок 2.47 Характеристика холостого хода  $E = f(I_B)$  при  $I = 0$  и характеристики  $\vartheta_B = I_B R_B$  (1÷4) при различных значениях сопротивления цепи возбуждения  $R_B$

В генераторе постоянного тока параллельного возбуждения обмотка возбуждения включена параллельно выводам обмотки якоря, поэтому  $E = \vartheta_B = R_B I_B$ . Напряжение генератора в установившемся режиме определяется точкой пересечения прямой  $\vartheta = R_B I_B$  с

характеристикой холостого хода. С уменьшением  $R_B$  напряжение  $\vartheta = E = \vartheta_B$  возрастает ( $R_{B1} < R_{B2}$ ).

Сопротивление  $R_{B3} = \left(\frac{dE}{dI_B}\right)_{I_B=0}$  является наибольшим сопротивлением при котором еще происходит самовозбуждение генератора.

При  $R_B \leq \left(\frac{dE}{dI_B}\right)_{I_B=0}$  генератор самовозбудится; при  $R_B > \left(\frac{dE}{dI_B}\right)_{I_B=0}$  генератор не самовозбудится и напряжение на его выводах останется близким к остаточному напряжению ( $E_{ост}$ ). Сопротивление  $R_{B3}$  критическое сопротивление.

ЭДС  $E$  определяется скоростью вращения якоря. На рис. 2.48 приведены характеристики холостого хода при различных значениях  $n_1 > n_2 > n_3$ .

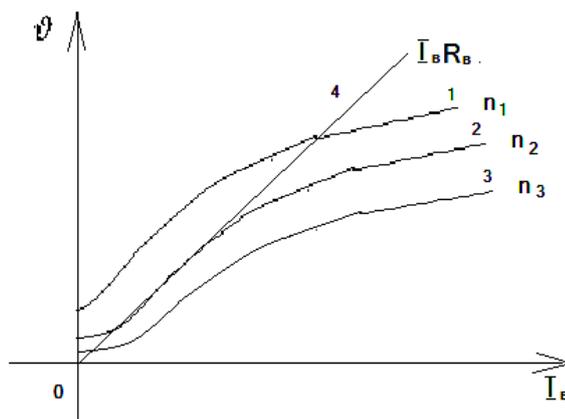


Рисунок 2.48 Характеристики холостого хода (1,2,3) генератора параллельного возбуждения при различных значениях скорости вращения якоря ( $n$ ) и падение напряжения на обмотке возбуждения (4)

При заданном  $R_B$  самовозбуждение возможно только для кривой 1, при характеристике 2 машина находится на грани самовозбуждения. При кривой 3 самовозбуждение невозможно.

Для каждого значения  $R_B$  существует  $n = n_{кр}$  ниже которой самовозбуждение невозможно.

В некоторых случаях требуется чтобы  $\vartheta$  генератора параллельного возбуждения регулировалась в широких пределах  $\vartheta_H : \vartheta_{min} = 5:1; 10:1$ . Для обеспечения этого условия необходимо,

чтобы характеристика холостого хода генератора искривлялась уже в своей начальной части.

Внешняя характеристика,  $\vartheta = f(I_{\text{я}})$ , снимается при  $R_{\text{в}} = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ , то есть без регулирования цепи возбуждения. Вследствие этого к двум причинам падения напряжения, указанных в генераторе независимого возбуждения прибавляется третья: уменьшение  $I_{\text{в}}$  при уменьшении  $\vartheta$ . Вследствии этого внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (Рис.2.49) падает круче, чем у генератора независимого возбуждения.

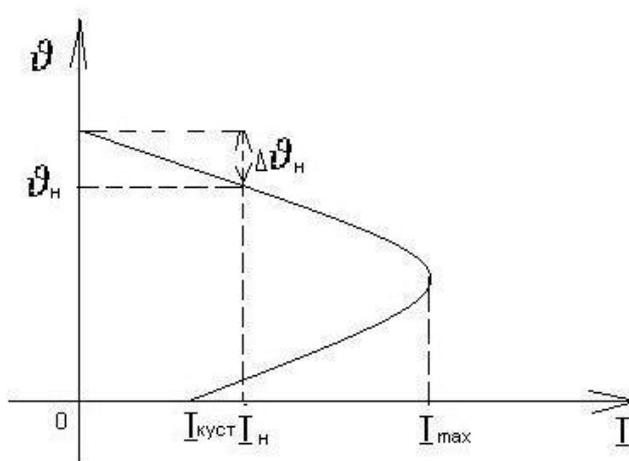


Рисунок 2.49 Внешняя характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

Поэтому номинальное изменение напряжения  $\Delta\vartheta_{\text{н}}\% = 10 \div 20\%$ . Характерной особенностью внешней характеристики генератора параллельного возбуждения является, то она делает петлю. Ток короткого замыкания ( $I_{\text{к.уст.}}$ ) относительно мал и определяется остаточным магнитным потоком, так как в данном случае  $\vartheta = 0$  и поэтому  $I_{\text{в}} = 0$ . Работа машины на нижней ветви неустойчива.

#### **Регулировочная характеристика.**

$I_{\text{в}} = f(I)$  при  $\vartheta = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ . Так как ток  $I_{\text{в}} \ll I_{\text{я}}$ , и  $R_{\text{я}} \cdot I_{\text{в}}$  мало, то падение напряжения в цепи якоря от тока  $I_{\text{в}}$  практически не оказывает влияние на напряжение на зажимах генератора. Поэтому регулировочная характеристика получается практически такой же, как и у генератора независимого возбуждения.

## Генератор постоянного тока последовательного возбуждения.

В генераторе последовательного возбуждения  $I_B = I_{\text{я}} = I$  и поэтому  $n = \text{const}$  имеются только две независимые переменные:  $\vartheta; I$ . Вследствие этого такой генератор имеет только одну характеристику, а именно внешнюю  $\vartheta = f(I)$  при  $n = \text{const}$  (Рис. 2.50).

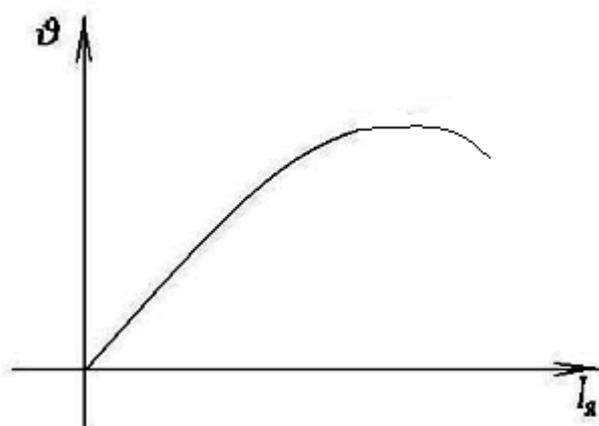


Рисунок 2.50 Внешняя характеристика генератора постоянного тока последовательного возбуждения

Для генератора последовательного возбуждения справедливо

$$\vartheta = E_{\text{я}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$$

При увеличении тока  $I_{\text{я}}$  растет  $\Phi_B$  и ЭДС  $E_{\text{я}}$ , поэтому с увеличением  $I_{\text{я}}$  вначале  $\vartheta$  растет линейно в следствии с приведенной формулой, а при достижении насыщения рост  $\vartheta$  уменьшается. При весьма большом  $I_{\text{я}}$  напряжение будет снова уменьшаться вследствие большей реакции якоря и большого падения напряжения  $R_{\text{я}}I_{\text{я}}$ .

Генератор постоянного тока смешанного возбуждения. Этот генератор самовозбуждается так же как и генератор параллельного возбуждения и их характеристики холостого хода аналогичны. Вид характеристик генератора в значительной степени определяется включением последовательной обмотки. Наиболее благоприятные характеристики имеет генератор с согласованным включением последовательной обмотки возбуждения. Генератор со встречным включением последовательной обмотки эквивалентен увеличению размагничивающему действию реакции якоря. Вследствие этого с увеличением нагрузки напряжение генератора сильно падает. Поэтому этот генератор применяется редко.

На рисунке 2.51 приведены для сравнения внешние характеристики рассмотренных генераторов.

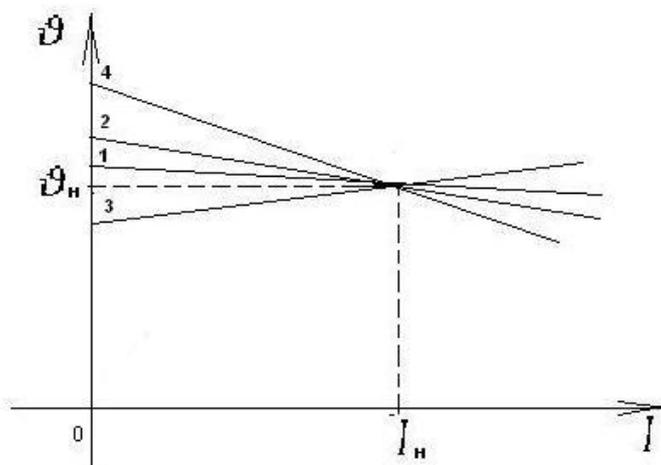


Рисунок 2.51 Внешние характеристики генератора постоянного тока: независимого возбуждения (1), параллельного возбуждения (2), смешанного возбуждения с согласованным включением обмоток (3), смешанного возбуждения с встречным включением обмоток (4).

На Рисунке 2.52 приведены регулировочные характеристики генераторов постоянного тока.

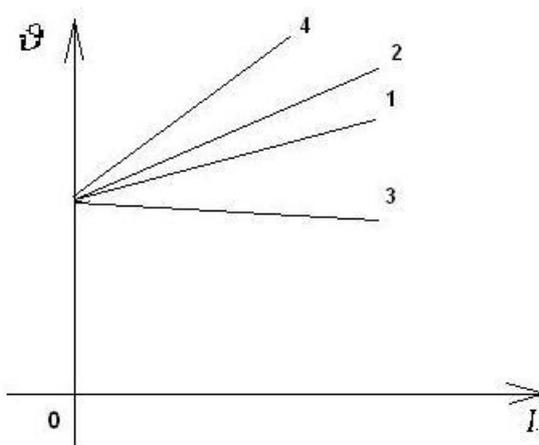


Рисунок 2.52 Регулировочные характеристики генератора постоянного тока: независимого возбуждения (1), параллельного возбуждения (2), смешанного возбуждения с согласованным включением обмоток (3), смешанного возбуждения с встречным включением обмоток возбуждения (4).

### 2.18 Специальные машины постоянного тока.

Машины постоянного тока с постоянными магнитами. Мы рассматривали машины постоянного тока с электромагнитным

возбуждением. Машины постоянного тока с постоянными магнитами для создания магнитного поля используют постоянные магниты в этом их отличие.

Двигатели с постоянными магнитами выпускаются мощностью от нескольких до сотен Вт. Используются в кратковременном или повторно – кратковременном режимах, пускаются в ход и реверсируются без реостатов в цепи якоря. Достоинства высокое КПД, облегченные условия охлаждения, меньшие габаритные размеры, масса и стоимость, более стабильное возбуждение. Недостатки: - нет возможности регулирования изменения поля возбуждения, - при большой мощности уступают по габаритным размерам, массе и стоимости машинам с электромагнитным возбуждением, - материалы входящие в состав сплавов для постоянных магнитов дефициты, - технология изготовления и намагничивания постоянных магнитов отличаются большой сложностью.

В многополюсных машинах ( $2p \geq 4$ ) с постоянными магнитами применяются радиальное расположение магнитов. В двигателях с  $2p = 2$  целесообразно тангенциальное расположение магнитов.

Генераторы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов находят применение в качестве датчиков частоты вращения – тахогенераторов.

Тахогенераторы представляют собой маломощные электрические генераторы ( $P_n = 10 \div 50$ Вт), которые служат в системах автоматики для преобразования скорости вращения в электрический сигнал ( $\vartheta_c$ ). От тахогенератора требуется линейная зависимость  $\vartheta_c = f(n)$  с точностью до 0,2 – 0,5%, а иногда с точностью до 0,01%. В маломощных тахогенераторах при  $n = 1000$ об/мин напряжение  $\vartheta_c = 3 \div 5$ В, а в более мощных тахогенераторах обычно при такой же скорости вращения  $\vartheta_c = 50 \div 100$ В. Тахогенераторы постоянного тока выпускаются и с электромагнитным возбуждением по схеме машин с независимым возбуждением при  $I_B = const$ .

**Электромашинные усилители (ЭМУ).** ЭМУ являются усилителями мощности, усилителями постоянного тока. На входе ЭМУ постоянный ток и на выходе усилителя постоянный ток.

Принцип действия ЭМУ ничем не отличаются от действия генератора постоянного тока.

Генераторы постоянного тока, как ЭМУ могут быть применены в системах автоматики для усиления мощности, получаемой от различных измерительных элементов.

Схему ЭМУ можно представить следующим образом (Рис. 2.53).

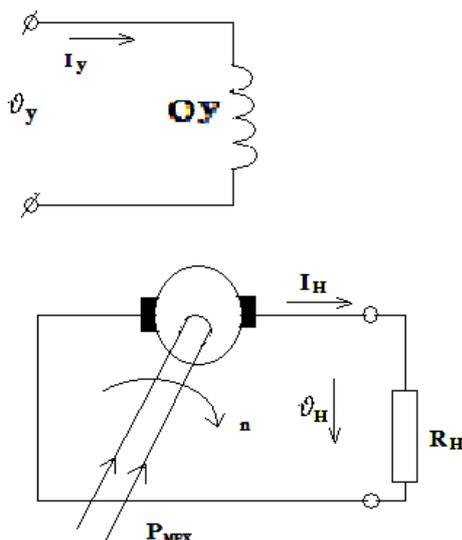


Рисунок 2.53 Схема ЭМУ на базе генератора независимого возбуждения

Источником мощности для работы усилителя является мощность  $P_{мех}$  приводного двигателя.

Входом ЭМУ является обмотка возбуждения (ОУ), а выходом – обмотка якоря.

$$P_{вх} = \vartheta_y \cdot I_y; \quad P_{вых} = \vartheta_H \cdot I_H,$$

тогда коэффициент усиления

$$K_y = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}.$$

Усиление мощности происходит за счет мощности приводного двигателя  $(P_{вых} - P_{вх})/\eta_y$ . При ненасыщенных магнитных цепях усилителя  $K_y = const$ . Запаздывание изменения  $P_{вых}$  от  $\vartheta_{вх}$  зависит от постоянной времени обмоток ЭМУ. Для увеличения быстродействия ЭМУ магнитопровод ЭМУ собирают из изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм.

Генератор с независимым возбуждением как усилитель может обеспечить усиление в 50 -100 раз, при приводе электродвигателем с постоянной скоростью ( $n = const$ ).

Двухякорные ЭМУ представляют собой каскадное включение двух генераторов постоянного тока.  $P_{вх}$  подается на обмотку возбуждения первого генератора, якорь первого генератора питает

обмотку возбуждения второго генератора.  $P_{\text{вых}}$  снимается с якоря второго генератора. С целью уменьшения габаритов и массы якоря генераторов размещен на одном валу, магнитные системы укреплены в общем корпусе. Коэффициент двухякорного усиления ЭМУ  $K_y = K_{y1} \cdot K_{y2} \approx 1000$ .

**Электромашинные усилители с поперечным полем.** Эти усилители получили наиболее широкое применение в современной технике. Этот вид усилителя применяются в ряде промышленных электроприводов как в качестве генератора, питающего непосредственно приводной двигатель, так и в качестве возбудителя мощных машин. Широкое внедрение электромашинного усилителя с поперечным полем определяется в первую очередь тем, что он дает возможность управлять электроприводами большой мощности посредством весьма малой мощности, подаваемой на входе усилителя.

ЭМУ с поперечным полем имеет относительно малую электромагнитную постоянную времени, что дает возможность увеличить скорость протекания переходных процессов. На рисунке 2.54 приведен принципиальная схема включения ЭМУ с поперечным полем.

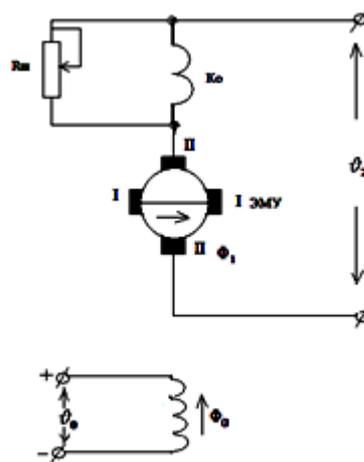


Рисунок 2.54 Электрическая схема включения ЭМУ с поперечным полем

Подобный усилитель имеет две обмотки: обмотку возбуждения, или управляющую обмотку и обмотку якоря. На коллекторе усилителя установлены под углом  $90^\circ$  две пары щеток по поперечной оси I-I и по продольной оси II-II. Щетки расположенные по оси I-I,

замкнуты накоротко; к щеткам, расположенным по оси П-П, присоединяется нагрузка.

Если к управляющей обмотке подвести напряжение, то в машине возникает неподвижный в пространстве поток  $\Phi_0$ , который вызовет прохождение тока в замкнутом контуре поперечной оси вращающегося якоря. Магнитный поток реакции якоря  $\Phi_1$  будет направлен вдоль оси поперечных щеток и будет также неподвижен в пространстве. На щетках продольной оси якоря поток  $\Phi_1$  наводит ЭДС. Если к щеткам продольной оси подключить нагрузку, то в цепи будет проходить ток, который создает поток реакции якоря, направленный в сторону противоположную  $\Phi_0$ ; поэтому для нормальной работы усилителя необходимо принять меры с целью его компенсации, что достигается применением компенсационной обмотки  $K_0$ . Точная настройка МДС компенсационной обмотки производится резистором  $R_{ш}$ . В ряде случаев электромашинный усилитель с поперечным полем имеет, кроме перечисленных обмоток, еще и другие, предназначенные для усиления потоков по продольной и поперечным осям, для целей стабилизации и т.д.

Электромашинный усилитель с поперечным полем можно представить, как двухкаскадный усилитель (Рис. 2.55).

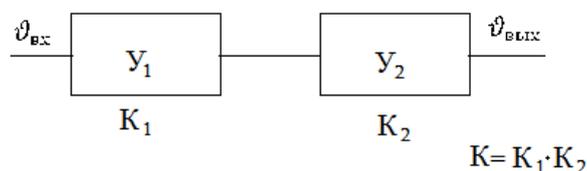


Рисунок 2.55 Представление ЭМУ с поперечным полем, как двухкаскадный усилитель ( $U_1$  и  $U_2$ )

Схематически это можно показать еще так, как на рисунке 2.56

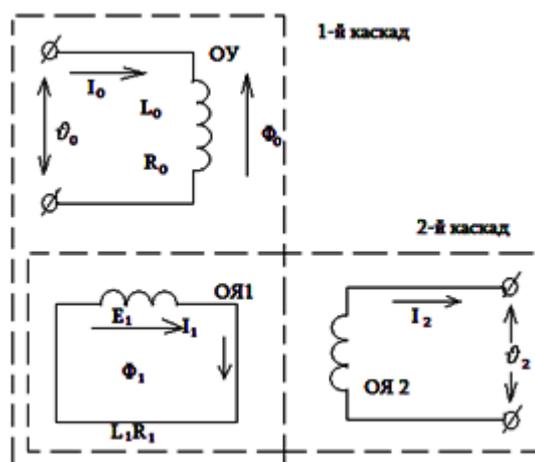


Рисунок 2.56 Схематическое представление ЭМУ с поперечным полем, как двухкаскадный усилитель

Первый каскад усиления включает в себя управляющую обмотку (ОУ) и короткозамкнутую якорную цепь (ОЯ1), второй - короткозамкнутую якорную цепь (ОЯ1), являющуюся обмоткой возбуждения второго каскада, совмещенную с якорной обмоткой (ОЯ2), и выходную цепь якоря. Обмотка управления усилителя создает незначительную намагничивающую силу, которая является достаточной для получения номинального тока в поперечной цепи.

Незначительная намагничивающая сила обмотки управления определяет малый вес ее, а следовательно, небольшую постоянную времени первого каскада.

Обмотка возбуждения второго каскада, расположенную по пазам якоря, получается легче, чем сосредоточенная обмотка полюсов у обычных генераторов. Поэтому постоянная времени второго каскада тоже сравнительно невелика.

Некоторые конструкции ЭМУ с поперечным полем имеют очень маленькую суммарную постоянную времени 0,07-0,1 с.

Коэффициент усиления по мощности с поперечным полем определяется выражением

$$K_y = \frac{\vartheta_2 I_2}{\vartheta_0 I_0},$$

где  $\vartheta_2$  - напряжение на выходе;

$I_2$  - ток нагрузки;

$\vartheta_0$  - напряжение на входе;

$I_0$  - ток управления. Можно представить

$$K_y = \frac{\vartheta_2 I_2}{E_1 I_1} \cdot \frac{E_2 I_2}{\vartheta_0 I_0} = K_{y2} K_{y1}$$

где  $E_1$  и  $I_1$  ЭДС и ток короткозамкнутого контура;

$K_{y1}$  - коэффициент усиления первого каскада;

$K_{y2}$  - коэффициент усиления второго каскада.

Электромашинный усилитель с поперечным полем имеет разные коэффициенты усиления: для первого каскада  $K_{y1}$  обычно значительно больше, чем для второго каскада. Примерное соотношение для коэффициентов усиления нормальной конструкции  $K_{y1} = 200$  и  $K_{y2} = 50$ . Общий коэффициент усиления  $K_y = 10000$ .

**Двигатели постоянного тока с безпазовым и печатным якорем.** В двигателях постоянного тока с безпазовым якорем обмотка располагается не в пазах зубчатого магнитопровода, как в обычных машинах постоянного тока, а укрепляется на гладкой цилиндрической ферромагнитной поверхности. Отсутствие пазов позволяет почти в 2 раза увеличить индукцию в зазоре. В несколько раз снижается индуктивность коммутируемой секции, что дает возможность получить приемлемые по условиям коммутации реактивную ЭДС при осуществлении повышенной линейной нагрузке якоря. Поэтому диаметр якоря в такой машине может быть существенно уменьшен, что дает возможность получить малый момент инерции и электромагнитную постоянную времени. Это ценное свойство для исполнительного двигателя. Вместе с тем в этой машине в несколько раз увеличивается немагнитный зазор. Для создания требуемой индукции при увеличенном в 2 раза зазоре требуется значительно большая МДС обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения занимает столько места, что машина с гладким якорем имеет большую массу, чем обычная машина с зубчатым якорем. Мощность таких машин может достигать несколько кВт.

Большим быстродействием обладают также исполнительные двигатели постоянного тока с печатным якорем. В этих двигателях магнитопровод якоря делается неподвижным, ротор представляет собой полый цилиндр на наружной и внутренней поверхности которого приклеены проводники обмотки якоря. Лентообразные проводники якоря создаются химическим способом отсюда и такое название. Возможно и торцевое исполнение якоря. В двигателях цилиндрического исполнения коллектор имеет обычную конструкцию, в двигателях торцевого исполнения коллектором

служит специально выделенная для этой цели зона активной части проводников якоря. Благодаря улучшенным условиям охлаждения допускается очень большая плотность тока. Так как проводники располагаются в немагнитном зазоре с  $B=2\text{Тл}$ . В них индуцируются вихревые токи, в сотни раз больше, чем при размещении проводников в пазах. В этих машинах необходимо применение специальных мер для уменьшения добавочных потерь.

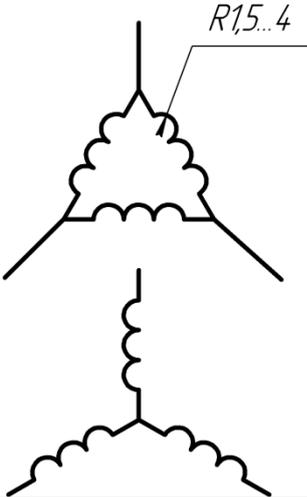
**Униполярные машины.** Униполярные или одноименнополюсные машины отличаются от всех прочих машин постоянного тока, тем, что в их якоре сразу генерируется ЭДС постоянного направления. Поэтому в них отсутствует преобразователь частоты, который имеется в том или ином виде во всех разноименнополюсных машинах постоянного тока. Эти машины имеют разное исполнение.

Униполярные генераторы применяются для получения больших токов (до  $1,5 \cdot 10^5$  А в длительном режиме, при низких напряжениях 1-100В). В униполярных машинах отсутствуют основные и добавочные магнитные потери. В качестве токосъема применяется жидкометаллический токосъем. Основное промышленное применение: питание электромагнитных ускорителей, электролиз.

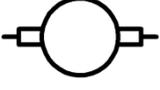
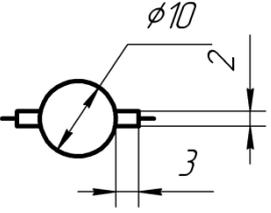
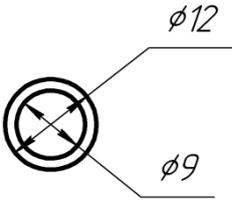
## Вопросы для самопроверки по главе

1. Что такое геометрическая нейтраль в машинах постоянного тока и как она определяется?
2. Объясните назначение добавочных полюсов.
3. Объясните назначение компенсационной обмотки.
4. Что такое физическая нейтраль и как она определяется?
5. Как осуществляется переход из двигательного режима в генераторный?
6. Объясните, почему происходит «разность» шунтового двигателя при обрыве цепи возбуждения?
7. Объясните, почему происходит «разнос» серийного двигателя, при снятии тормозящего момента?
8. Каково назначение коллектора в генераторе и двигателе?
9. Сколько параллельных ветвей имеет обмотка якоря шестиполюсной машины в случаях простой петлевой и простой волновой обмотки?
10. Какими соображениями руководствуются при выборе типа обмотки якоря?
11. В чем сущность явления реакции якоря машины постоянного тока?
12. С какой целью компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря?
13. Какие способы возбуждения применяют в МПТ?
14. Какие причины могут вызвать искрение на коллекторе?
15. Объяснить назначение и устройство добавочных полюсов?
16. Какие степени искрения предусмотрены ГОСТом?
17. Какие характеристика определяют свойства генераторов постоянного тока?
18. Каковы условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?
19. Какие способы ограничения пускового тока применяются в двигателях постоянного тока?

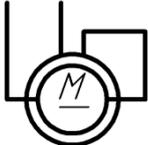
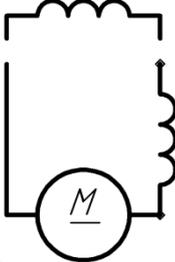
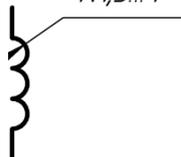
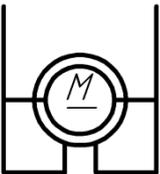
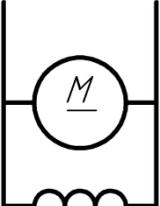
Таблица 1. Условные графические и буквенные обозначения наиболее распространенных элементов, применяемых в электрических схемах

Наименование	Обозначение	Размеры	Примечание	Букв. код
1	2	3	4	5
Машины электрические ГОСТ 2.722 -68				
Статор, обмотка статора. Общее обозначение				
Ротор. Общее обозначение				
Статор с трехфазной обмоткой: а) соединенной в треугольник  б) соединенной в звезду	  			
Ротор с распределенной обмоткой: а) трехфазной, соединенной в звезду б) трехфазной, соединенной в треугольник в) однофазной или постоянного тока г) короткозамк - нутой	      			

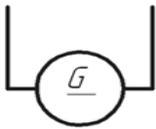
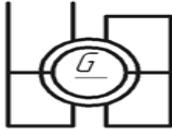
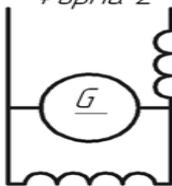
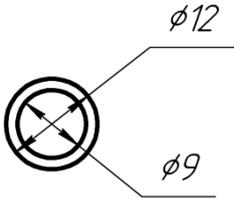
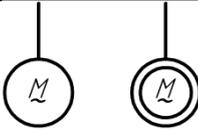
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Ротор с обмоткой, коллектором и щетками				
<p>Машина электрическая общее обозначение</p> <p>Например: генератор трехфазный</p>			<p>Внутри окружности допускается указать следующие данные:</p> <p>а) род машины (генератор - Г, двигатель - М, генератор синхронный - GS, двигатель синхронный - MS, сельсин - ZZ, преобразователь - С),</p> <p>б) род тока, число фаз или вид соединения обмоток в соответствии с требованиями ГОСТ 2.750-68</p>	
Двигатель асинхронный однофазный с короткозамкнутой обмоткой ротора				М

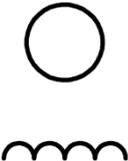
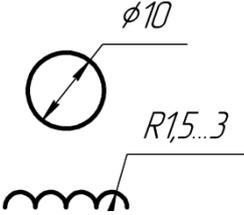
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<p>Двигатель трехфазный с соединением обмоток статора в звезду</p>				<p>М</p>
<p>Двигатель линейный, общее обозначение</p>				<p>М</p>
<p>Двигатель шаговый, общее обозначение</p>				<p>М</p>
<p>Машина постоянного тока с последовательны м возбуждением</p>	<p><i>Форма 1</i></p>  <p><i>Форма 2</i></p> 	<p><i>R1,5...4</i></p> 		<p>М</p>
<p>Машина постоянного тока с параллельным возбуждением</p>	<p><i>Форма 1</i></p>  <p><i>Форма 2</i></p> 			<p>М</p>

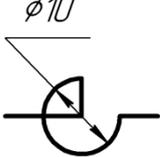
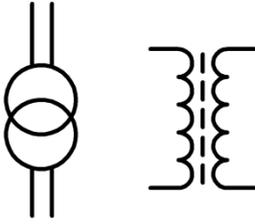
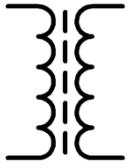
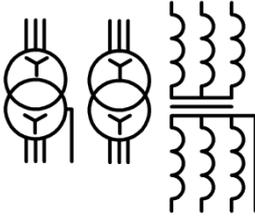
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<p>Машина постоянного тока с независимым возбуждением</p>	<p>Форма 1</p>  <p>Форма 2</p> 			М
<p>Машина постоянного тока со смешанным возбуждением</p>	<p>Форма 1</p>  <p>Форма 2</p> 			М
<p>Двигатель асинхронный с фазным ротором, общее обозначение</p>				М
<p>Двигатель асинхронный с короткозамкнутой ротором, общее обозначение</p>				М
<p>Двигатель асинхронный трехфазный, соединенный в треугольник, короткозамкнуты ротором</p>				М

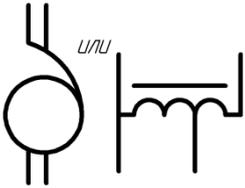
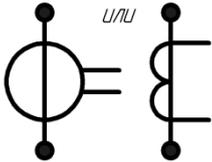
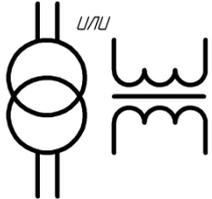
Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<p>Сельсин, общее обозначение</p> <p>Например: Сельсин-датчик угла поворота</p>	 		<p>Для конкретных типов внутри вписывают соответствующий квалифицирующий символ. Первая буква символа обозначает:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>С - управление;</li> <li>Т - угол поворота;</li> <li>Р – решающее устройство.</li> </ul> <p>Вторая буква обозначает:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Д- дифференциальный;</li> <li>Р - приемник;</li> <li>Т - преобразователь;</li> <li>Х - датчик;</li> <li>В - с поворотной статорной обмоткой.</li> </ul>	
<p>Трансформаторы и автотрансформаторы ГОСТ 2.723-68</p>				
<p>Обмотка трансформатора, автотрансформатора, дросселя и магнитного усилителя</p>			<p>Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливается</p>	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Для указания начала обмотки используют точку				
Катушка индуктивности, дроссель без магнитопровода				
Ротор. Обозначение устанавливается для схем энергоснабжения				
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом				
Трансформатор без магнитопровода с постоянной связью				
Трансформатор магнитоэлектрический				
Трансформатор трехфазный с ферромагнитным магнитопроводом; соединение обмоток звезда-звезда с выведенной нейтральной (средней) точкой				

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<p>Автотрансформатор однофазный с ферромагнитным магнитопроводом</p>				
<p>Трансформатор с одной вторичной обмоткой</p>				
<p>Трансформатор напряжения измерительный</p>				

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) Muller, G.: Elektrische Maschinen Theorie, Berlin: VEB Verlag Technik 1966.
- 2) Вольдек А.Н. Электрические машины. М.; Л: Энергия, 1966.
- 3) Важнов А.Н. Электрические машины Л.: Энергия, 1969
- 4) Пиотровский Л.М. Электрические машины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1975г. -504 с.
- 5) Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980г. 496с.
- 6) Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств – М.: Высшая школа, 1988г., 479с.
- 7) Справочник по электрическим машинам / под редакцией И.П. Копылова, Б.К. Клохова, М.: Энергоатомиздат, 1989г.
- 8) Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. Энергоатомиздат М., 1989г. -400с.
- 9) Брускин Д.Э. Зарохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990г.
- 10) Токарев Б.Ф. Электрические машины. –М.: Энергоатомиздат, 1990г. 624с.
- 11) Иванов – Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов /А.В. Иванов – Смоленский. – М.: Издательство МЭИ, 2004г. - 928с.
- 12) Вакурин В.Н. Электрические машины: учебное пособие / В.Н. Вакурин – М.: Энергия, 2006г.- 380с.
- 13) Епифанов А.П. Электрические машины: учебник СПб: Издательство «Лань», 2006. -272с.: пл-(учебник для вузов. Специальная литература)
- 14) Копылов И.П. Электрические машины. –М.: Логос, 2007г. -607с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
1. Синхронные электрические машины	5
1.1 Конструкция синхронных электрических машин (синхронных машин)	5
1.2 Векторные диаграммы синхронного генератора при различной нагрузке	7
1.3 Уравнения напряжения синхронного генератора	11
1.4 Характеристика синхронного генератора работающего на автономную нагрузку	13
1.5 Потери и КПД синхронных машин	19
1.6 Работа трехфазного синхронного генератора параллельно с сетью (особенности работы генераторов в электрической системе)	21
1.7 Включение на параллельную работу синхронных генераторов	21
1.8 Угловая характеристика. Синхронизирующая мощность	24
1.9 Регулирование реактивной мощности $\vartheta$ – образные характеристики синхронного генератора	29
1.10 Синхронный компенсатор	33
1.11 Синхронные двигатели: способы пуска, характеристики, области применения	37
1.12 Специальные синхронные машины	40
Вопросы для самопроверки по главе	47
2. Машины постоянного тока	48
2.1 Устройство машин постоянного тока (МПТ)	48
2.2 Обмотки якорей машин постоянного тока	50
2.3 Коммутация	52
2.4 Способы улучшения коммутации	54
2.5 Получение постоянного ЭДС якоря	57
2.6 Электродвижущая сила машины постоянного тока	59
2.7 Принцип действия двигателя и формула электромагнитного момента	61
2.8 Поле машины постоянного тока при нагрузке	62
2.9 Классификация машин постоянного тока по способам возбуждения	66
2.10 Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения	70

2.11 Построение механических характеристик двигателя независимого возбуждения по каталожным данным	75
2.12 Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения в тормозных режимах	76
2.13 Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	82
2.14 Механические характеристики двигателя последовательно возбуждения в тормозных режимах	88
2.15 Потери энергии и КПД машин постоянного тока	91
2.16 Характеристики генераторов постоянного тока	94
2.17 Генератор независимого возбуждения	94
2.18 Специальные машины постоянного тока	101
Вопросы для самопроверки по главе	109
Приложение	110
Библиографический список	117