

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛЖСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»
САМАРСКИЙ ФИЛИАЛ ФГБОУ ВО «ВГАВТ»
УПРАВЛЕНИЕ СПО – САМАРСКИЙ РЕЧНОЙ ТЕХНИКУМ**

С.В. Шашкин

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Учебное пособие
МДК 01.01 СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**для специальности
180407 Эксплуатация судового
электрооборудования и средств автоматики**

**САМАРА
2014**

Шашкин, С.В. Основы теории электрических машин: учебн. пособие МДК 01.01. Судовые электрические машины для спец. 180407 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики/С.В. Шашкин; ФГБОУ ВО «ВГАВТ», Самарский филиал.- Самара, 2014.- 43 с.: ил.

Учебное пособие «Основы теории электрических машин» для студентов средних специальных учебных заведений специальности 180407 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики.

В пособии в доступной форме изложены основы теории электрических машин. Для наглядности каждый раздел пособия снабжен схемами, иллюстрирующими устройство и принципы работы электрических машин. Пособие может быть использовано как для аудиторной, так и для домашней самостоятельной работы студентов при изучении МДК 01.01 «Судовые электрические машины».

Автор – преподаватель Самарского филиала ФГБОУ ВО «ВГАВТ», капитан III ранга Сергей Валентинович Шашкин. Пособие рассмотрено на заседании ПЦК Эксплуатации судовых энергетических установок, судового электрооборудования и средств автоматики и утверждено методическим советом филиала 24.12.2013 г.

Шашкин Сергей Валентинович

Основы теории электрических машин

Учебное пособие
МДК 01.01 Судовые электрические машины

Редактор О.В. Жаровская

Подписано в печать
Формат А4. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 2,7
Тираж 50 экз.

Библиотечно-информационный отдел Самарского филиала ФГБОУ ВО «ВГАВТ»
443099, Самара, ул. Молодогвардейская, 62/64

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	6
1. Принципы работы электрических машин постоянного тока	8
1.1. Принципы работы генератора постоянного тока	8
1.1.1. Назначение и работа коллектора и составных частей электрической машины	8
1.1.2. Величины наводимой ЭДС	9
1.1.3. Реакция якоря генератора и меры борьбы с нею	9
1.1.4. Типы генераторов постоянного тока. Характеристики генераторов	11
1.2. Принципы работы электродвигателей постоянного тока	15
1.2.1. Принципы работы. Свойство обратимости электрических машин	15
1.2.2. Назначение коллектора	16
1.2.3. Реакция якоря у электродвигателей	17
1.2.4. Реверс двигателей постоянного тока	17
1.2.5. ЭДС якоря (противо-ЭДС якоря)	17
1.2.6. Регулирование скорости (числа оборотов) двигателей постоянного тока	18
1.2.7. Основные типы электродвигателей постоянного тока	18
2. Трансформаторы	22
2.1. Основы теории. Общие сведения	22
2.2. Принцип работы трансформатора. Закон постоянства потокоцепления (магнитного потока)	23
2.3. Обозначение трансформаторов в электрических схемах	24
2.4. Типы трансформаторов	25
2.4.1. Однофазные трансформаторы	25
2.4.2. Трехфазные трансформаторы	25
2.4.3. Автотрансформаторы	26
2.4.4. Измерительные трансформаторы	28
3. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором	31
3.1. Создание вращающегося магнитного поля	31
3.2. Принцип работы асинхронных двигателей	32
3.3. Основные виды асинхронных электродвигателей	33
3.3.1. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором	33
3.3.2. Асинхронные двигатели с фазным ротором	34
3.3.3. Способы пуска асинхронного двигателя	35
3.3.4. Регулирование скорости асинхронного двигателя	36
3.3.5. Реверс (изменение направления вращения) асинхронного двигателя	37
3.3.6. Принцип обратимости асинхронного двигателя. Физический смысл тормозных режимов	37

4. Трехфазные синхронные машины	37
4.1. Трехфазные синхронные генераторы	37
4.1.1. Явнополюсные и неявнополюсные генераторы	38
4.1.2. Реакция якоря синхронной машины	39
4.1.3. Внешние характеристики синхронного генератора	40
4.1.4. Включение синхронных генераторов в параллельную работу	40
4.2. Трехфазные синхронные электродвигатели	41
4.2.1. Способы пуска синхронного электродвигателя	41
4.2.2. Частотный пуск, частотное регулирование и реверс синхронного электродвигателя	42
4.3. Синхронные компенсаторы	42
Список литературы	43

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения теоретической части междисциплинарного курса «Судовые электрические машины», входящего в состав профессионального модуля ПМ 01. Техническая эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики. Пособие адресовано преподавателям и студентам средних специальных учебных заведений водного транспорта специальности 180407 Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики.

В учебном пособии рассматриваются физические и теоретические основы электромеханического преобразования энергии в электрических машинах, излагаются конструктивные схемы различных типов электрических машин, анализируются их потребительские и эксплуатационные характеристики и качества, а также принципы управления электрическими машинами.

Автор в сжатой и максимально доступной форме изложил основы теории электрических машин, рассмотрев последовательно их принципы работы и основные характеристики, способы пуска и включения в работу для электродвигателей и генераторов.

ВВЕДЕНИЕ

В электрических машинах действуют все законы электротехники, но определяющими для них являются:

- определение направления ЭДС по правилу правой руки (см. рис. 1);
- определение направления силы по правилу левой руки (см. рис. 2).

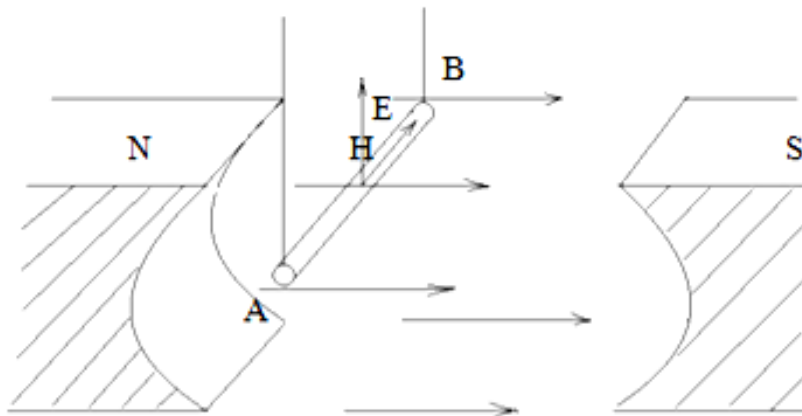


Рис. 1. Определение направления ЭДС по правилу правой руки

AB – стержень, расположенный перпендикулярно магнитному полю (H);

$\rightarrow V$ – направление движения стержня;

$\rightarrow E$ – направление ЭДС.

Правило правой руки: магнитные силовые линии входят в ладонь (с N к S), большой палец отогнут по направлению движения проводника ($\rightarrow V$), четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС ($\rightarrow E$).

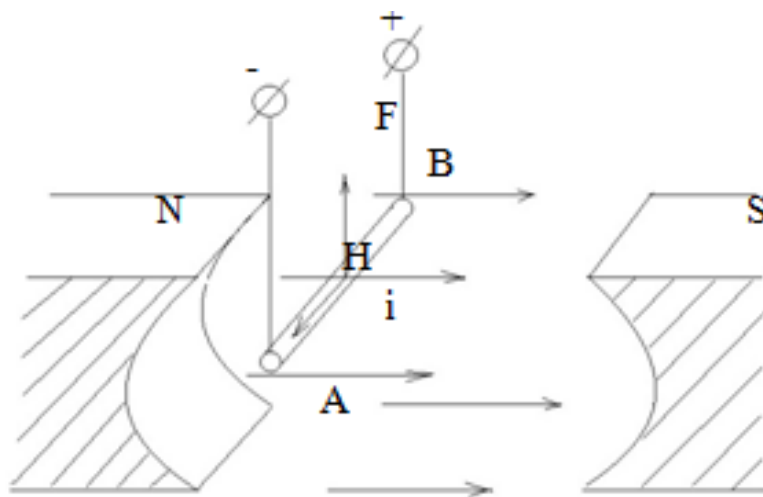


Рис. 2. Определение направления силы по правилу левой руки

AB – стержень (проводник);

$\rightarrow H$ – напряженность магнитного поля;

$\rightarrow i$ – ток (от + к –);

$\rightarrow F$ – сила Ампера.

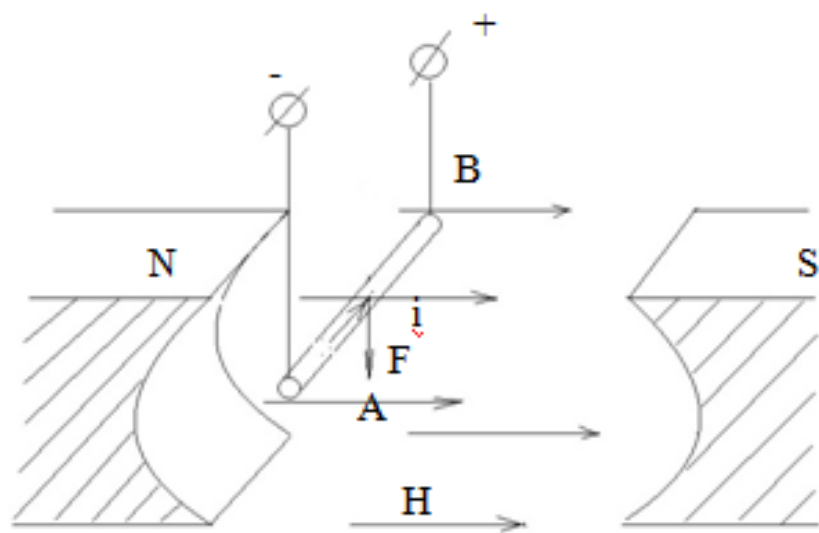


Рис. 3. Определение направления силы по правилу левой руки

Правило левой руки: магнитные силовые линии входят в ладонь (с N к S), четыре пальца вытянуты по направлению тока ($\rightarrow i$), большой отогнутый палец указывает направление действующей силы ($\rightarrow F$).

1. Принцип работы электрических машин постоянного тока

1.1. Принцип работы генератора постоянного тока (см. рис. 4-7)

1.1.1. Назначение и работа коллектора и составных частей электрической машины

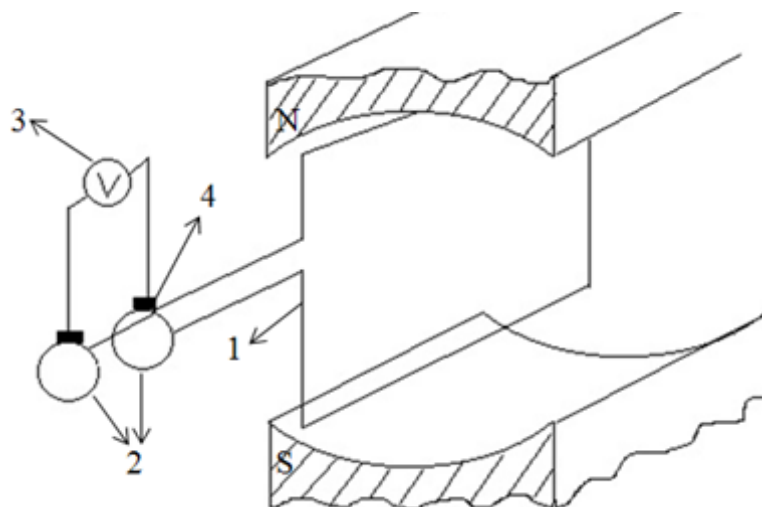


Рис. 4. Получение ЭДС

1 – рамки; 2 – кольца; 3 – вольтметр; 4 – щетки.

Если, как показано на рисунке 4, в магнитном поле (N-S) вращать рамку (проводник), то в ней появится переменная ЭДС, т.к. один и тот же проводник при одном обороте дважды пересекает магнитные силовые линии поля (N-S) в разных направлениях (см. рис. 5).

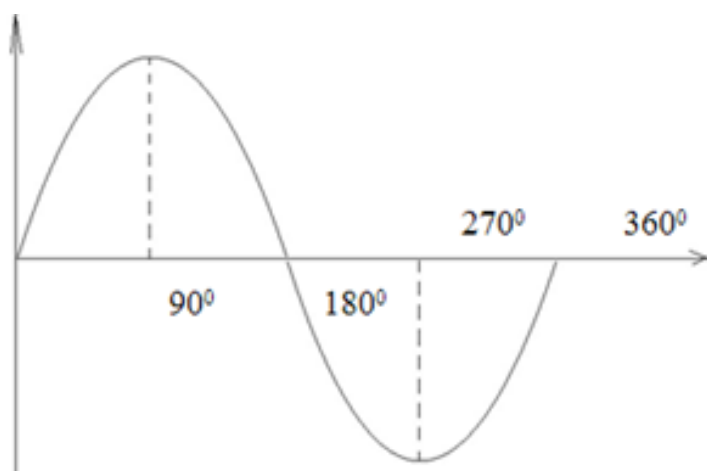


Рис. 5. График полученной ЭДС

На рисунке 6 концы рамки (витка) присоединены к разрезанному пополам кольцу, а не к отдельным кольцам, полученные полукольца разделены изолирующим материалом и надеты на общий цилиндр, который вращается на одной оси с рамкой. Этими полукольцами прижимаются пружинящие контакты (щетki), с помощью которых происходит отвод электрической энергии во внешнюю сеть. При каждом полуобороте рамки (витка) концы ее, припаянные к полукольцам, переходят с одной щетки на другую, если переключение происходит в те же моменты, когда меняется направление ЭДС, то

одна из щеток всегда будет являться положительным полюсом электрической машины, а другая отрицательным. В результате ЭДС во внешней цепи не меняет своего направления, т.е. выпрямляется (см. рис.7).

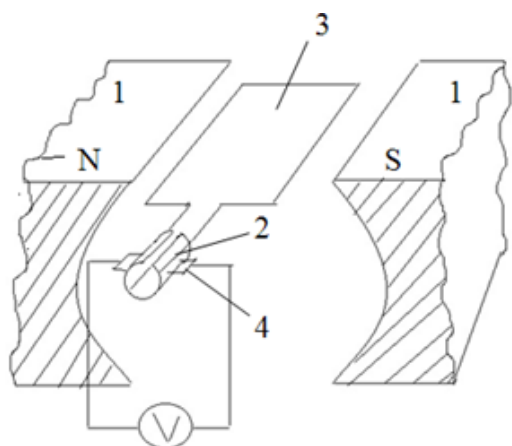


Рис. 6. Получение знакопостоянной ЭДС

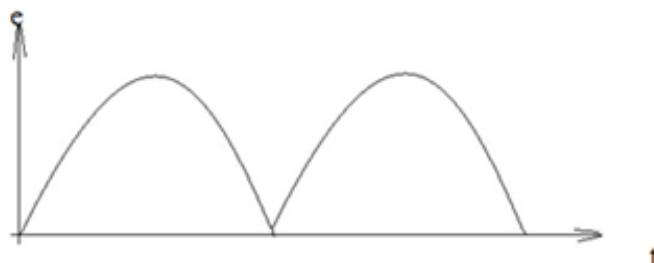


Рис. 7. График полученной знакопостоянной ЭДС

1. N-S – полюса магнита;
2. полукольца;
3. рамки;
4. щетки;

Такое разрезанное на части кольцо называется коллектором, а отдельные его части - коллекторными пластинами.

Рамки или витки, вращающиеся в магнитном поле и несущие наибольшую токовую нагрузку, называются якорем. Магниты обычно расположены на неподвижной части электрической машины – станине (статоре), который является магнитопроводом электрической машины.

Следовательно, коллектор – это механический выпрямитель, позволяющий превратить переменное напряжение на якоре в постоянное напряжение во внешней цепи.

1.1.2. Величины наводимой ЭДС

Из курса ТОЭ известно, что величина ЭДС в проводнике зависит:

1. от величины индукции магнитного поля (или магнитного потока Φ);
2. от скорости движения проводника в магнитном поле (n);
3. от длины проводника;
4. от угла пересечения проводником магнитных силовых линий.

Следовательно, ЭДС генератора прямо пропорциональна величине магнитного потока (Φ) и скорости пересечения проводниками магнитных силовых линий (n), т.е.:

$$E = C_e \times \Phi \times n$$

где C_e – коэффициент, учитывающий особенности данной электрической машины (в том числе и пункты 3 и 4).

1.1.3. Реакция якоря генератора и меры борьбы с ней

При работе генератора без нагрузки (холостой ход) тока в обмотке якоря нет. Магнитный поток полюсов Φ_n при холостом ходе машины направлен перпендикулярно к его геометрической нейтрали А-Б (см. рис. 8а).

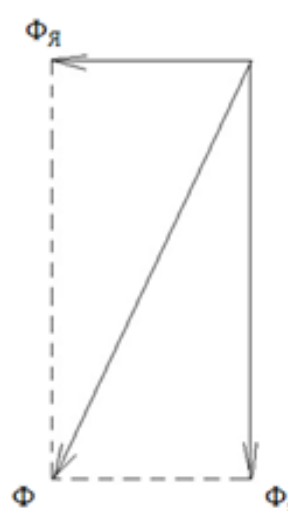
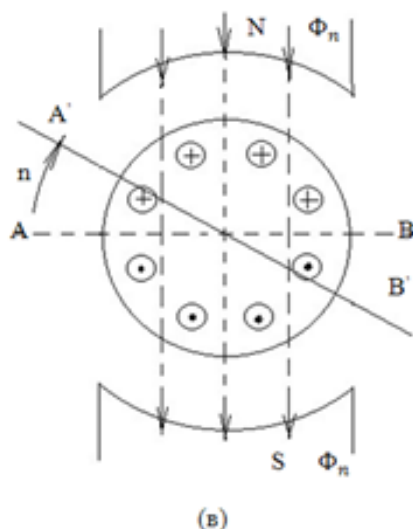
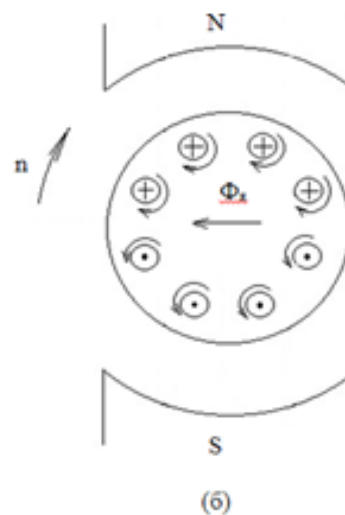
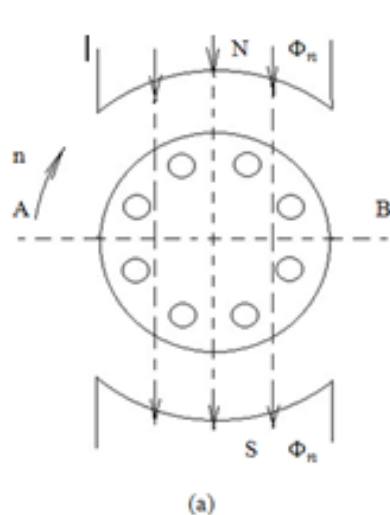


Рис. 8. Реакция якоря

Рис. 9. График уменьшения влияния реакции якоря усилением магнитного потока главных полюсов

Если замкнуть внешнюю цепь генератора, то по ней потечет ток, который также потечет и по цепи якоря. А, т.к. по обмотке якоря потечет ток, то вокруг каждого витка образуется магнитное поле, направление которого определяется по правилу буравчика. Результирующее магнитное поле (магнитный поток) будет направлено вдоль геометрической нейтрали А-Б (см. рис.8б). Чем больше ток нагрузки генератора, тем больше магнитный поток якоря. В результате этого произойдет смещение результирующего магнитного потока электрической машины в сторону вращения от главных полюсов и от якоря (см. рис. 8в и 9).

Смещение результирующего магнитного потока машин вызывает поворот нейтрали в сторону вращения (из положения А-Б в положение А'-Б' - так называемую «физическую нейтраль»). Т.е., чтобы снять максимальную ЭДС с генератора и избежать искрения щеток, необходимо установить щетки на новую (физическую) нейтраль. Чем больше будет ток якоря (нагрузка генератора), тем больший угол поворота щеток потребуется.

Такое действие магнитного поля якоря на магнитный поток главных полюсов называется реакцией якоря.

Реакция якоря – вредное явление в работе электрической машины. Наиболее широкое распространение получили два метода борьбы с ней:

1. усиление магнитного потока полюсов – уменьшает сдвиг нейтрали (см. рис. 9), т.к. это влияет на вырабатываемую ЭДС генератора ($E = C_e \times \Phi \times n$), то подобное усиление достигается за счет уменьшения магнитного сопротивления главных полюсов.
2. установка дополнительных полюсов на геометрической нейтрали.(см.рис.10)

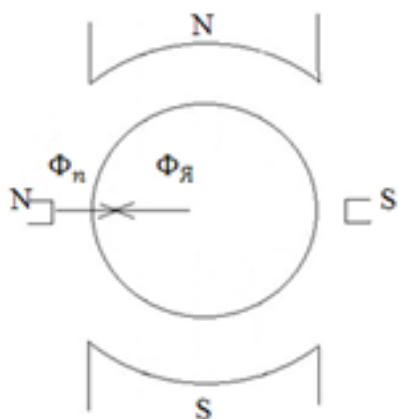


Рис. 10 (а). Действие добавочных полюсов

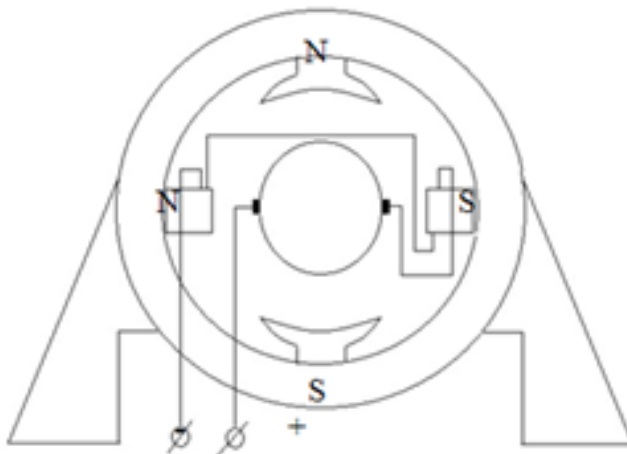
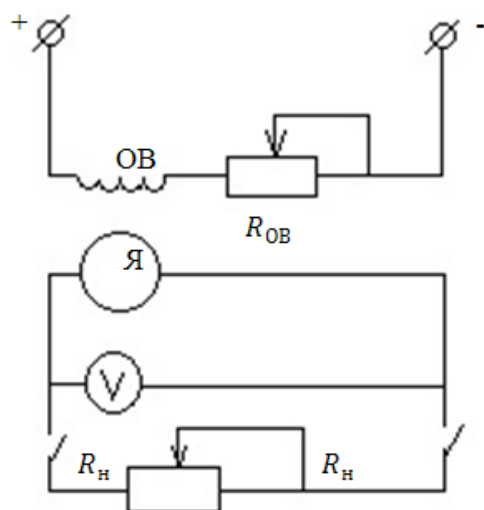


Рис. 10 (б). Подключение добавочных полюсов

Магнитный поток дополнительных (добавочных полюсов $\Phi_{дп}$) направлен против магнитного потока якоря $\Phi_{я}$ (см. рис.10а).

Чтобы устранить изменения магнитного потока якоря с изменением нагрузки, необходимо одновременное изменение магнитного потока добавочных полюсов. Это достигается тем, что обмотка добавочных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря. Для мощных электрических машин применяют специальную компенсационную обмотку, закладываемую в полюсных наконечниках. Компенсационная обмотка, так же как и обмотка дополнительных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря.

1.1.4. Типы генераторов постоянного тока. Характеристики генераторов



А) Генераторы с постоянными магнитами.

При помощи постоянных магнитов создать сильное магнитное поле затруднительно, поэтому такие генераторы могут дать только небольшую мощность.

Б) Генераторы с независимым возбуждением.

Основным требованием, предъявляемым к каждому генератору, является поддержание постоянного напряжения на его зажимах.

Рис. 11. Схема генератора с независимым возбуждением

На рис. 11 показана электрическая схема соединения генератора с независимым возбуждением и включения его в сеть.

ОВ – обмотка возбуждения;

$R_{ОВ}$ - реостат в обмотке возбуждения

Я – якорь возбуждения;

V – вольтметр;

R_n – сопротивление нагрузки.

Падение напряжения на зажимах генератора происходит по двум причинам:

а) падение напряжения на обмотке якоря

$$U = E - I_a R_a \text{ (закон Ома для полной цепи)}$$

б) размагничивающее действие реакции якоря, т.е. электрическая машина развозбуждается. Вследствие реакции якоря происходит размагничивание одной части статора электрической машины и подмагничивание другой, но из-за насыщения магнитной цепи машины, реакция якоря в конечном итоге оказывает размагничивающее действие, а, следовательно, уменьшает магнитный поток Φ , и, ведет к уменьшению ЭДС.

$$(E = C_e \cdot \Phi \cdot n)$$

Зависимость напряжения генератора от тока якоря (тока внешней цепи) называется внешней характеристикой генератора. Она для генератора независимого возбуждения будет иметь вид, показанный на рис.12.



Рис.12. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

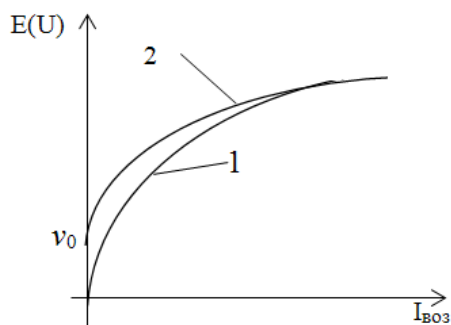


Рис.13. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Кроме внешней характеристики генератора рассматривается характеристика его холостого хода – зависимость ЭДС генератора в зависимости от тока возбуждения при постоянных оборотах машины ($n = \text{const}$) и при отсутствии нагрузки ($I_a = 0$). При отсутствии нагрузки ($I_a = 0$) ЭДС генератора равно напряжению на его зажимах ($U = E$).

Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением показана на рис.13.

На кривой 1 видно, что с увеличением тока возбуждения ЭДС генератора сначала растет интенсивно, затем медленнее, затем увеличение ЭДС прекращается из-за насыщения магнитной цепи машины. Когда же мы начнем уменьшать ток возбуждения, то при тех же самых значениях тока возбуждения ЭДС генератора будет больше при $I_{воз} = 0$. Значение ЭДС генератора не будет равным нулю, а вольтметр покажет какое-то значение U_0 . Это объясняется намагничиванием магнитной цепи электрической машины (влияние гистерезиса).

В) Генераторы с самовозбуждением делятся на три группы:

- генераторы с параллельным возбуждением;
- генераторы с последовательным возбуждением;

- генераторы со смешанным возбуждением.

В генераторах со смешанным возбуждением ток в обмотку возбуждения подается от своего якоря.

Самовозбуждение протекает следующим образом: за счет остаточного намагничивания полюсов в электрической машине присутствует слабый магнитный поток, а как следствие, и ЭДС генератора, увеличивающая магнитный поток обмотки возбуждения, и т. д. Процесс продолжается, пока напряжение генератора не станет нормальным.

Исходя из этого определения, можно сформулировать следующие условия самовозбуждения:

- наличие остаточного магнитного потока (остаточного намагничивания ($\approx 2 - 5\%$ от нормального);
- обмотка возбуждения должна создавать поток, совпадающий по направлению с магнитным потоком остаточного намагничивания;
- скорость вращения электрической машины должна быть близка к номинальной;
- электрическое сопротивление обмотки возбуждения должно быть меньше критического.

Генератором с параллельным возбуждением называется такой генератор, у которого обмотка возбуждения (ОВ) подключена параллельно обмотке якоря (Я) (см. рис. 14). Обмотка якоря подает напряжение, как во внешнюю цепь, так и на обмотку возбуждения.

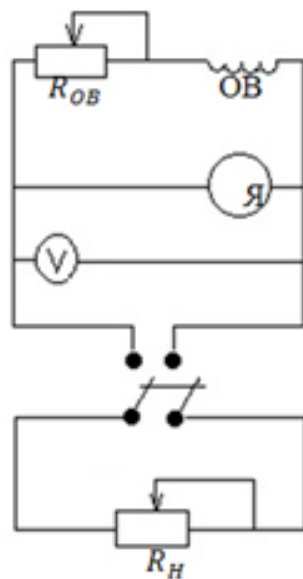


Рис. 14. Схема генератора с параллельным возбуждением

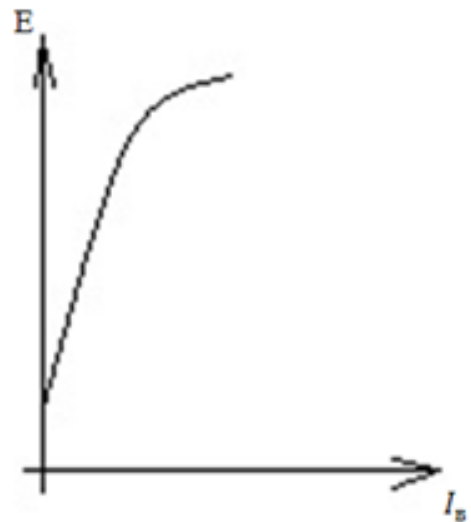


Рис. 15. Характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением

При разомкнутой внешней цепи (холостой ход) и постоянной скорости вращения на щетках генератора за счет остаточного намагничивания появится ЭДС ($E = \mathcal{U}$). Эта ЭДС вызовет увеличение магнитного потока обмотки возбуждения (ОВ) и как следствие, ЭДС генератора $E = C_e \cdot \Phi \cdot n$.

Если при холостом ходе и $n = \text{const}$ изменять ток возбуждения, то вместе с ним изменяется и ЭДС генератора. Эта зависимость $E = f(I_b)$ называется характеристикой холостого хода генератора (см. рис.15). Она аналогична графику 2 (см. рис.13).

Если замкнуть цепь якоря с параллельным возбуждением на сопротивление внешней цепи (R_h) (см. рис.14), при постоянных оборотах ($n = \text{const}$), и постоянном $R_{ов}$

($R_{об} = const$), то при увеличении нагрузки (тока) напряжение генератора будет уменьшаться. Падение напряжения у генератора с параллельным возбуждением происходит по трем причинам:

1. падение напряжения в обмотке якоря ($U = E - I \cdot R_a$)
2. реакция якоря
3. уменьшение тока возбуждения из-за уменьшения напряжения на якоре, а, следовательно, и на обмотке возбуждения.

Внешняя характеристика — зависимость выходного напряжения от нагрузки $U = f(I_n)$ — показана на рис.16.



Рис. 16. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

При уменьшении сопротивления внешней цепи ток в цепи увеличивается, увеличивая и ток якоря I_a , следовательно, напряжение генератора с параллельным возбуждением уменьшается (кривая на рис.16). Однако, начиная с определенного значения внешнего сопротивления, напряжение генератора начнет сильно уменьшаться, что вызовет уменьшение тока якоря, (пунктирная линия на рис.16). Поэтому генераторам с параллельным возбуждением короткое замыкание значительно менее опасно, чем генераторам с независимым, последовательным и смежным возбуждением.

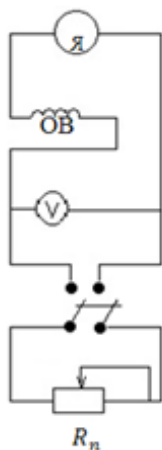


Рис. 17. Схема генератора с последовательным возбуждением

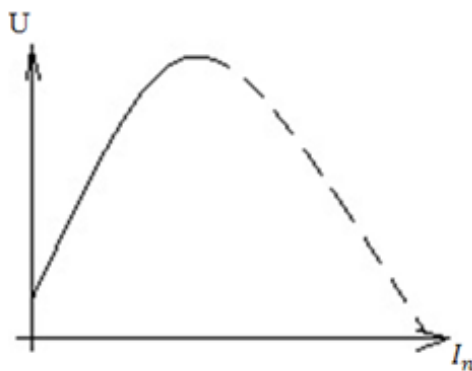


Рис. 18. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

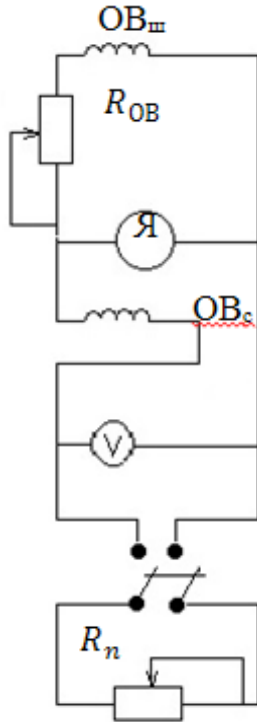
Генератор с последовательным возбуждением — это генератор, у которого обмотка, возбуждения (ОВ) включена последовательно с обмоткой якоря (Я) (см. рис.17).

При разомкнутой внешней цепи генератор последовательного возбуждения возбудиться не может, т.к. $I_{об} = I_a = 0$. Следовательно, такой генератор не имеет

характеристики холостого хода, для его возбуждения необходимо включить внешнюю цепь (R_h). Чем меньше R_h , тем больше $I_n = I_{\text{я}} = I_{\text{ов}}$, следовательно, с увеличением I_h будут возрастать ЭДС и $\mathcal{U}$ генератора $U = E - I_a - R_a$, и внешняя характеристика такого генератора имеет вид, показанный на рис.18.

Сплошная линия на графике характеризует увеличение входного напряжения вследствие увеличения тока возбуждения (магнитного потока), пунктирная линия – уменьшение выходного напряжения на якоре и размагничивающего действия реакции якоря.

Рис. 19. Схема генератора со смешанным возбуждением



Генератор со смешанным возбуждением – это генератор, имеющий две обмотки возбуждения, одна из которых включена последовательно с якорем, другая (шунтовая) – параллельно, как показано на рис.19.

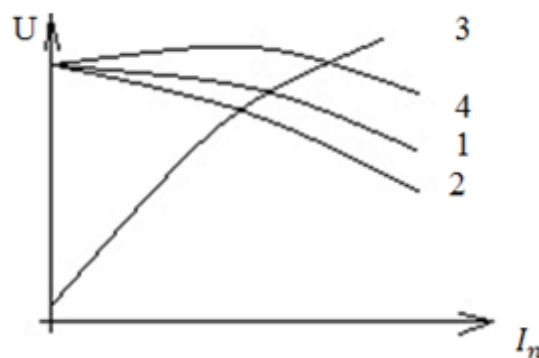
При работе на холостом ходу, при отключенной R_h , генератор смешанного возбуждения ведет себя как генератор с параллельным возбуждением. Так как последовательная обмотка возбуждения ($ОВ_c$) не создает на холостом ходу магнитного потока, ее ток равен нулю.

Следовательно, характеристика холостого хода такого генератора аналогична характеристике холостого хода генератора с параллельным возбуждением.

При работе генератора со смешанным возбуждением на внешнюю цепь он объединяет в себе свойства генераторов с последовательным и параллельным возбуждением.

Если с увеличением нагрузки напряжение генератора с параллельным возбуждением падает, то последовательная обмотка генератора со смешанным возбуждением будет компенсировать это падение и увеличивать напряжение.

Соответственно, внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением будет выглядеть как кривая 4 на рисунке 20, на котором для сравнения изображены внешние характеристики всех изученных нами генераторов.



1. генератор с независимым возбуждением;
2. генератор с параллельным возбуждением;
3. генератор с последовательным возбуждением;
4. генератор со смешанным возбуждением.

Рис. 20. Внешние характеристики генераторов с различными типами возбуждения

1.2. Принципы работы электродвигателей постоянного тока

1.2.1. Принципы работы. Свойство обратимости электрических машин

Каждая электрическая машина обладает свойством обратимости. Т.е. любой генератор под нагрузкой создает момент сопротивления первичному двигателю, а любой

работающий электродвигатель создает ЭДС, направленную против приложенного напряжения. Наиболее ярко это свойство обратимости проявляется у электрических машин постоянного тока. Если на любой генератор постоянного тока подать постоянное напряжение, то он сам станет электродвигателем, т.е. начнет вращаться, преобразуя электрическую энергию в механическую. И, наоборот, если, любой электродвигатель постоянного тока вращать с помощью первичного двигателя, то он станет генератором, превращая механическую энергию в электрическую.

Устройство электрических двигателей такое же, как у генераторов. По роду возбуждения электродвигатели постоянного тока используют взаимодействие тока в обмотке якоря (I_a) с магнитным потоком полюсов (Φ). Поэтому вращающий момент ($M_{вр}$), развиваемый двигателем при работе, пропорционален току якоря и магнитному потоку полюсов $M_{вр} = C_m I_a \Phi$, где C_m – постоянный для данной машины коэффициент.

1.2.2. Назначение коллектора

Направление силы, действующей на проводники с током в магнитном поле, определяется правилом левой руки. Если не менять направление тока в проводнике, то направление этой силы будет постоянно меняться, как показано на рис. 21.

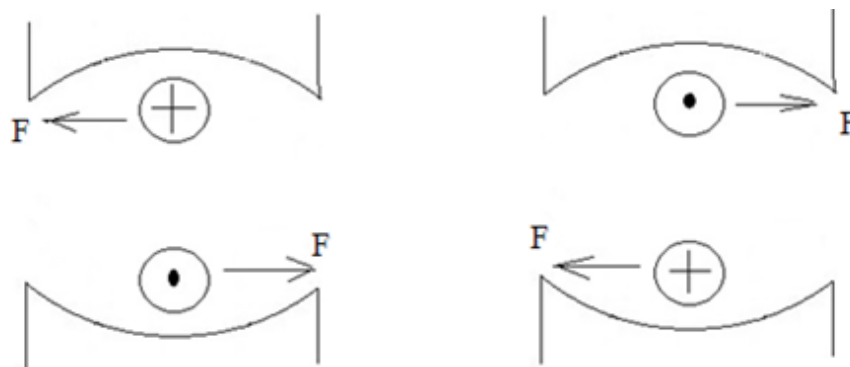


Рис. 21. Силы, действующие на проводник с током

Поворот проводников (якоря) происходит до тех пор, пока верхний проводник (направление тока от нас) не перейдет под южный полюс, тогда произойдет изменение направления электромагнитной силы (F).

Чтобы заставить якорь электродвигателя непрерывно вращаться в одну сторону, нужно изменить направление тока в проводнике на обратное (при пересечении нейтральной линии). Этим механическим преобразователем и является коллектор (см. рис. 22).

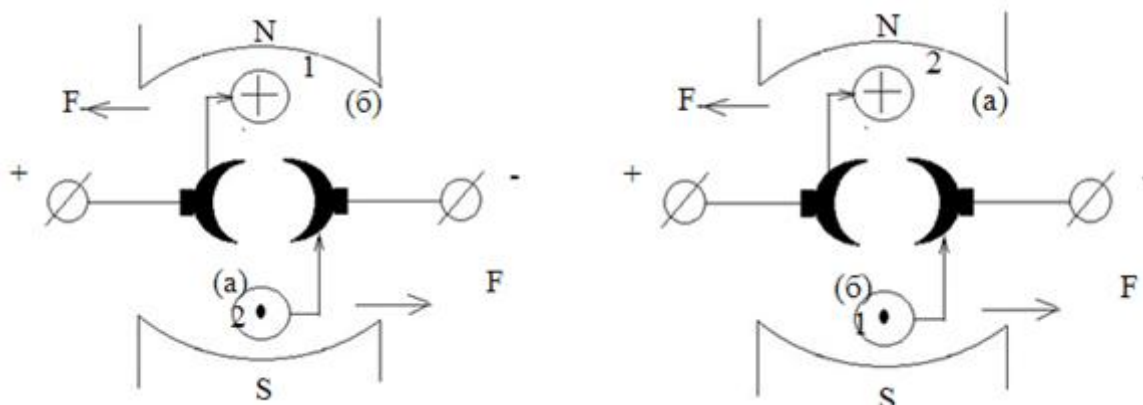


Рис. 22. Принцип работы коллектора: 1 и 2 – проводники, соединенные с коллекторными пластинами а и б

В положении, указанном на левом рисунке, под положительную щетку подошла коллекторная пластина (а), соединенная с проводником (1), под отрицательной щеткой находится пластина (б), соединенная с проводником (2). По проводнику (1) проходит ток в направлении «от нас», по проводнику (2) ток в направлении «к нам». По правилу левой руки сила F , следовательно, и электромагнитный момент будут иметь указанное на рисунке направление.

В положении, указанном на правом рисунке, проводник (1) находится внизу, он подключен к другой щетке, и направление тока в нем изменяется на противоположное (ситуация с проводником (2) аналогична). Соответственно, направление силы F и электромагнитного момента не изменяется.

Устройство коллектора электродвигателя аналогично устройству коллектору генератора (в машинах постоянного тока).

1.2.3. Реакция якоря у электродвигателей

Аналогично реакции якоря у генераторов (см. п.1.1.3.) магнитный поток якоря электродвигателя, действуя на магнитный поток полюсов, искажает магнитное поле машины. Ось магнитного поля смещается в сторону, обратную вращению якоря. Происходит смещение физической нейтральной от геометрической. Во избежание искрения щеток их приходится смещать в ту же сторону. Реакция якоря уменьшает магнитный поток машины и, как следствие этого, увеличиваются обороты электродвигателя (см. п.1.2.6.). Меры борьбы с реакцией якоря у электродвигателей те же, что и у генераторов (см. п.1.1.3.).

1.2.4. Реверс (перемена направления вращения) двигателей постоянного тока

Согласно правилу «левой руки» направление силы, действующей на проводник с током, зависит от направления тока в проводнике (см. рис. 21).

Изменить направление движения проводника можно так же переменной полярности полюсов (или направления тока возбуждения)

Согласно правилу «левой руки» (см. рис. 21) понятно, что одновременная перемена полярности полюсов и направления тока в проводнике реверса не вызовет.

Следовательно, чтобы изменить направление вращения электродвигателя постоянного тока, нужно:

- либо изменить направление тока в обмотке якоря (поменять полярность на якоре) при неизменном магнитном потоке, оставив прежним направление тока в обмотке возбуждения;
- либо полярность направления магнитного потока (поменять полярность на обмотке возбуждения), оставив прежним направление тока в обмотке якоря (при неизменной полярности на обмотке якоря).

Одновременное изменение полярности на обмотке якоря и обмотке возбуждения не изменит направление вращения двигателя.

1.2.5. ЭДС якоря (противо-ЭДС якоря)

Ток из сети, проходя по проводникам обмотки якоря и взаимодействуя с магнитным полем полюсов, заставляет якорь двигателя вращаться. Однако, в тех же самых проводниках обмотки якоря, при пересечении магнитного поля полюсов, будет осуществляться ЭДС (принцип обратимости электрических машин). Следовательно, при работе электродвигателя в проводниках якоря будут действовать напряжение сети и индуцированная (наведенная) ЭДС. Эта ЭДС будет направлена против приложенного напряжения внешней сети. И величина ее будет определяться по уже знакомой нам формуле (см. п.1.1.2.):

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n$$

Так как эта ЭДС направлена противоположно приложенному направлению внешней сети, она называется противо-ЭДС.

Противо-ЭДС меньше напряжения сети на величину падения напряжения на обмотке якоря, а, т.к. сопротивление якоря очень мало, то и падение напряжения на нем невелико. Следовательно, при установившейся работе двигателя, напряжение сети отличается от противо-ЭДС на очень небольшую величину (иногда, при грубых расчетах, принимается $U \approx E$).

По закону Ома, для работающего электродвигателя ток якоря (I_a) будет определяться по формуле: $I_a = \frac{U-E}{R_a}$ или, т.к. $E = C_e \cdot \Phi \cdot n$

$$I_a = \frac{U - C_e \cdot \Phi \cdot n}{R_a}$$

где I_a – ток якоря;

Φ – магнитный поток двигателя;

n – скорость (число оборотов якоря двигателя);

R_a – электрическое сопротивление якоря двигателя.

1.2.6. Регулирование скорости (числа оборотов) двигателей постоянного тока

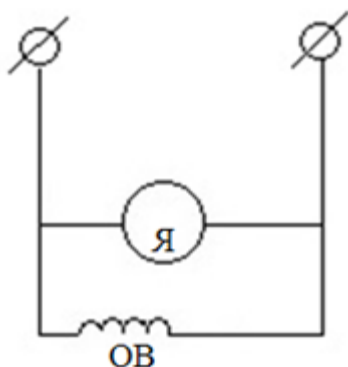
Т.к. величина противо-ЭДС пропорциональна магнитному потоку, и числу оборотов якоря $E = C_e \cdot \Phi \cdot n$, то обороты двигателя $n = \frac{E}{C_e \Phi}$, а, т.к. $E \approx U$ (см. п.п. 1.2.5.), то мы можем записать $n \approx \frac{U}{C_e \Phi}$.

Из формулы видно, что число оборотов электродвигателя прямо пропорционально напряжению сети и обратно пропорционально магнитному потоку машины. Следовательно, чтобы уменьшить число оборотов электродвигателя, необходимо, либо уменьшить проводимое к якорю напряжение, либо уменьшить магнитный поток полюсов. Для увеличения все делается наоборот. Однако, нельзя увеличивать напряжение больше номинального, т.к. произойдет резкое увеличение тока холостого хода из-за перенасыщения магнитной цепи машины, и уменьшать магнитный поток ниже критического, потому что возможен «разнос» электродвигателя.

1.2.7. Основные типы электродвигателей постоянного тока

1.2.7.1. Электродвигатели с параллельным возбуждением

Электродвигатель с параллельным возбуждением – это такой электродвигатель, у которого обмотка возбуждения включена параллельно с обмоткой якоря (см. рис. 23).



Как видно на рисунке, обмотка возбуждения электродвигателя составляет отдельную параллельную ветвь и, следовательно, ток в ней не зависит от условий работы якоря.

Рис. 23. Схема электродвигателя с параллельным возбуждением

На самом якоре противо-ЭДС меньше напряжения сети (U) на величину падения напряжения на обмотке якоря:

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n, \text{ то } n = \frac{E}{C_e \Phi}, \text{ или } n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

С увеличением нагрузки на валу электродвигателя уменьшится $n \downarrow$, следовательно, и противо-ЭДС, равное $E = C_e \Phi \cdot n$, также уменьшится. Но, так как, сопротивление якоря (R_a) очень мало и составляет сотые и тысячные доли Ома, а магнитный поток почти постоянный, то и число оборотов (n) электродвигателя меняется мало, практически от холостого хода до полной нагрузки $\approx$ на 5÷10 %. Вращающий момент электродвигателя равен: $M_{вр} = C_m \cdot I \cdot \Phi$.

Магнитный поток (Φ) такого электродвигателя почти не меняется, и момент вращения пропорционален току якоря. Так, например, при увеличении момента сопротивления на валу электродвигателя (с параллельным возбуждением), момент вращения, чтобы быть равным моменту сопротивления (1-й закон Ньютона для вращающихся тел) должен увеличиваться в два раза, а для электродвигателей с параллельным возбуждением (при $\Phi = \text{const}$), это возможно, если ток якоря так же увеличивается в два раза.

а) Регулировать число оборотов (n) электродвигателя с параллельным возбуждением можно (согласно формуле $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$) тремя способами:

1. изменением напряжения питающей сети (U);
2. изменением магнитного потока (Φ);
3. изменением сопротивления в цепи якоря (R_a).

б) Реверс электродвигателя, как и у всех электродвигателей постоянного тока достигается:

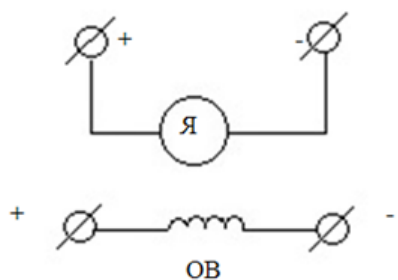
- изменением полярности на якоре электродвигателя, т.е. изменением направления тока якоря (при неизменном магнитном потоке);
- изменением направления магнитного потока при неизменном направлении тока якоря.

Последний способ применяется на практике очень редко, так как в момент переключений $\Phi = 0$, и, следовательно, ($n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$), n будет стремиться к бесконечности $n \rightarrow \infty$, поэтому возможен «разнос» электродвигателя. Так же при переключении в обмотке возбуждения возникает большая ЭДС самоиндукции, способная пробить изоляцию обмотки.

Преимущества электродвигателей с параллельным возбуждением:

- большой начальный вращающий момент;
- приблизительно постоянные обороты при различных нагрузках;
- малая вероятность «разноса»;
- удобное и плавное регулирование скорости;
- возможность при торможении возвращать энергию в сеть (подробно будет рассмотрено при изучении МДК «Судовые электроприводы»).

1.2.7.2. Электродвигатели с независимым возбуждением



Электродвигателем с независимым возбуждением называется такой электродвигатель, у которого обмотка возбуждения получает питание от какого-либо независимого источника питания (напряжения), отличного от источника питания якоря.

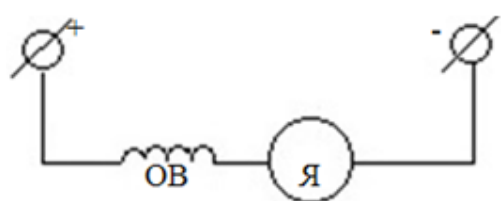
Рис.24. Схема электродвигателя с независимым возбуждением

Электрическая схема такого электродвигателя показана на рисунке 24.

Как видно на рис. 24, обмотка возбуждения получает питание от отдельной независимой сети, и, следовательно, ток в ней так же, как и у двигателей с параллельным возбуждением не зависит от условий работы якоря.

Т.е., электродвигатель с независимым возбуждением имеет те же самые характерные особенности, достоинства и недостатки, способы регулирования числа оборотов и реверса, что и электродвигатели постоянного тока с параллельным возбуждением (см. п. 1.2.7.1.).

1.2.7.3. Электродвигатели с последовательным возбуждением



Электродвигатель с последовательным возбуждением – это электродвигатель, обмотка возбуждения которого включена последовательно с обмоткой якоря (см. рис.25).

Рис.25. Схема электродвигателя с последовательным возбуждением

Так как $M_{вр} = C_m I_a \Phi$, а обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, следовательно, по ним идет один и тот же ток, то вращающий момент не пропорционально, а значительно больше.

Увеличив ток якоря в 2 раза, а, следовательно, и магнитный поток в два раза, получим увеличение вращающего момента в четыре раза. Т.е., если момент сопротивления на валу электродвигателя увеличивается в четыре раза и, т.к. в установившемся режиме движения, $M_{сопр} = M_{вр}$ (1-й закон Ньютона для вращающихся тел), то для увеличения $M_{вр}$ ток якоря увеличивается всего в два раза. Следовательно, при одном и том же увеличении вращающего момента двигатель с последовательным возбуждением забирает из сети меньший ток (меньше энергии), и является более экономичным, чем электродвигатели с независимым и параллельным возбуждением. Это свойство так же удобно при пуске электродвигателя.

Согласно формуле: $n \approx \frac{U}{C_e \Phi}$, увеличение магнитного потока вызовет уменьшение числа оборотов электродвигателя. Поэтому, каждое увеличение нагрузки электродвигателя ведет к значительному уменьшению числа оборотов, и, наоборот, с уменьшением нагрузки обороты двигателей значительно возрастают. При отсутствии нагрузки возможен «разнос» электродвигателя с последовательным возбуждением.

а) Регулирование оборотов такого электродвигателя может производиться, как изменением напряжения, так и изменением магнитного потока, путем шунтирования последовательной обмотки возбуждения.

б) Реверс осуществляется аналогично машинам постоянного тока с последовательным возбуждением.

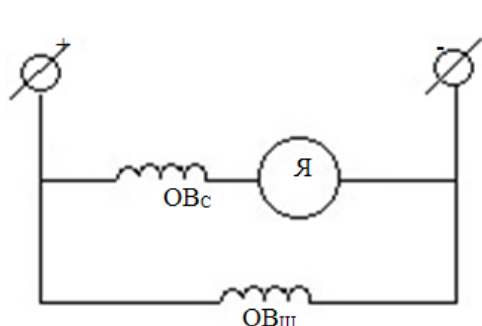
Преимущества электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением:

1. Большой пусковой момент;
2. Большая возможность перегрузки;
3. Большая экономичность (по сравнению с электродвигателями с независимым и последовательным возбуждением).

Недостатки электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением:

1. Большая зависимость оборотов (скорости) от величины нагрузки;
2. сложность в регулировании оборотов (скорости);
3. двигатель может работать только с достаточной нагрузкой на валу, при снятии нагрузки возможен «разнос».

1.2.7.3. Электродвигатели со смешанным возбуждением



Электродвигатель со смешанным возбуждением - это электродвигатель, имеющий две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную (шунтовую) (см. рис.26).

Рис. 26. Схема электродвигателя со смешанным возбуждением

Так как электродвигатель со смешанным возбуждением имеет две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную, то он имеет свойства электродвигателей с последовательным и параллельным возбуждением. В зависимости от того, какие свойства для определенной машины предпочтительнее, усиливают действие магнитных потоков последовательной или параллельной обмоток.

Обороты (скорость) электродвигателя со смешанным возбуждением уменьшаются с увеличением нагрузки, что не так редко, как у электродвигателей с последовательным возбуждением, т.к. неизменный магнитный поток параллельной обмотки возбуждения стремится сохранить обороты (скорость) электродвигателя.

При работе с малой нагрузкой исключен «разнос», как у двигателей с последовательным возбуждением, т.к. магнитный поток параллельной обмотки возбуждения неизменен.

Реверс и регулирование числа оборотов (скорости) электродвигателей со смешанным возбуждением осуществляется по общим принципам для всех электродвигателей постоянного тока.

Преимущества электродвигателей со смешанным возбуждением:

1. Большой пусковой момент;
2. возможность выбора желаемой характеристики работы;
3. допустимость большой перегрузки;
4. удобство регулирования числа оборотов (скорости);
5. снижение вероятности «разноса»

Недостаток: сложность конструкции.

1.2.8. Способы пуска электродвигателей постоянного тока

- 1) По закону Ома для работающего электродвигателя $I_a = \frac{U - C_e \cdot \Phi}{R_a}$, при пуске $n = 0$, а следовательно ЭДС (противо-ЭДС) равная $C_e \cdot \Phi \cdot n = 0$, значит, при пуске $I_a = \frac{U}{R_a}$, а так как R_a , достаточно мало, то пусковой ток необходимо уменьшить из-за требований к электроэнергетической системе – большой ток вызовет провал напряжения сети;
- 2) большой пусковой ток вызывает большие магнитные поля, которые могут привести к сбою в работе электронной техники.

3) из-за наличия щеточно-коллекторного аппарата, достаточно чувствительного к большим токам).

Согласно формуле, при пуске $I_a = \frac{U}{R_a}$, следовательно, пусковой ток можно уменьшить, уменьшив величину подводимого напряжения U , либо увеличив R_a , введя добавочное сопротивление в цепь якоря. Это достигается различными способами уменьшения подводимого напряжения, либо вводом (с последующим выводом) добавочного сопротивления в цепь якоря ($R_a + R_{доб}$).

Примечание: Для электродвигателей последовательного возбуждения введение добавочного сопротивления в цепь якоря так же является уменьшением величины подводимого напряжения.

Тормозные режимы в электродвигателях постоянного тока будут рассмотрены более подробно в МДК «Судовые электроприводы». Физический смысл процессов торможения заключается в том, что ток якоря меняет свое направление, а так как $M_{вр} = C_m I_a \Phi$, то электромагнитный момент $M_{вр}$ поменяет свое направление и станет тормозным.

2. Трансформаторы

При практическом использовании энергии электрического тока часто возникает необходимость изменить напряжение, вырабатываемое генератором. Осуществлять такого рода преобразования постоянного напряжения довольно трудно, или это сопряжено с большими потерями мощности. Переменное же напряжение можно преобразовывать (повышать или понижать) довольно просто и почти без потерь энергии. Это одна из основных причин, по которой в энергетике и вообще в технике используется в основном переменный, а не постоянный ток.

Приборы, с помощью которых производится преобразование напряжения переменного тока, называются трансформаторами.

2.1.1. Основы теории. Общие сведения

Трансформатор – это электрический аппарат, основанный на принципе взаимной индукции. Простейший трансформатор имеет стальной сердечник и две обмотки, изолированные, как от сердечника, так и друг от друга (см. рис. 27).



Рис. 27. Принципиальная схема простейшего трансформатора

Обмотка, подключенная к источнику тока, называется первичной обмоткой, обмотка, подключенная к потребителям, называется вторичной обмоткой.

Переменный ток, переходя по первичной обмотке, создает переменное магнитное поле, индукционные линии которого, замыкаясь по сердечнику трансформатора, пересекают витки вторичной обмотки и наводят в ней ЭДС.

Так как магнитный поток переменный, то и индуцированная ЭДС, полученная во вторичной обмотке, так же переменна, и частота ее равна частоте тока в первичной обмотке.

Переменный магнитный поток, проходящий по сердечнику трансформатора, пересекает кроме вторичной первичную обмотку трансформатора, следовательно, в первичной обмотке так же будет индуцироваться ЭДС.

Величины ЭДС, индицирующихся в обмотках трансформатора, зависят от частоты переменного тока в первичной обмотке, числа витков каждой обмотки и величины магнитного потока в сердечнике.

Так как магнитный поток (Φ) один и тот же для всех обмоток, то в каждом витке каждой обмотки индуцируется ЭДС (e), полная же ЭДС (E) возникающая в каждой обмотке (первичной и вторичной), равна произведению e и числа первичной (W_1) или вторичной (W_2), обмотки, т.е. $E_1 = e \cdot W_1$, $E_2 = e \cdot W_2$, исходя из этого $\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$, где:

E_1 – ЭДС непрерывной обмотки;

E_2 – ЭДС вторичной обмотки;

W_1 – число витков первичной обмотки;

W_2 – число витков вторичной обмотки.

Вольтметры V_1 и V_2 (см. рис.27) покажут напряжения V_1 и V_2 этих обмоток. Эти напряжения будут отличаться от ЭДС из-за потерь намагничивания (потери в стали) и на падение напряжения на самих обмотках (потери в меди).

Однако, эти потери очень незначительны, и мы можем допустить $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}$ или $\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2}$.

Разница между ЭДС (E) и напряжением в обмотках трансформатора особенно мала, когда вторичная обмотка разомкнута, т.е. ток в ней отсутствует. Тогда $E_2 = U_2$, а по первичной обмотке W_1 , протекает небольшой намагничивающий ток, называемый током холостого хода.

Число, показывающее, во сколько раз напряжение в первичной обмотке (W_1) отличается от напряжения во вторичной обмотке (W_2), т.е. больше или меньше него, называется коэффициентом трансформации трансформатора: $K = \frac{U_1}{U_2}$.

Из формулы $\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2}$ видно, что во сколько раз напряжение в первичной обмотке больше или меньше напряжения вторичной обмотки, во столько же раз число витков в первичной обмотке больше или меньше числа витков вторичной обмотки, или:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = k \text{ или } k = \frac{W_1}{W_2}$$

Поэтому коэффициент трансформации это отношение числа витков в первичной обмотке к количеству витков во вторичной обмотке.

Трансформаторы, служащие для повышения напряжения ($U_2 > U_1$) называются повышающими трансформаторами ($K < 1$).

Трансформаторы, служащие для понижения напряжения ($U_2 < U_1$), называются понижающими трансформаторами ($K > 1$).

2.2. Принцип работы трансформатора. Закон постоянства потокоцепления (магнитного потока)

При подаче в первичную обмотку (W_1), трансформатора напряжения (U_1), по ней протекает ток. Этот ток, проходя по первичной обмотке трансформатора, создает магнитный поток (Φ), который, проходя по сердечнику трансформатора и намагничивая его, будет индуцировать в обмотках трансформатора ЭДС (E_1 и E_2) (см. рис.28).

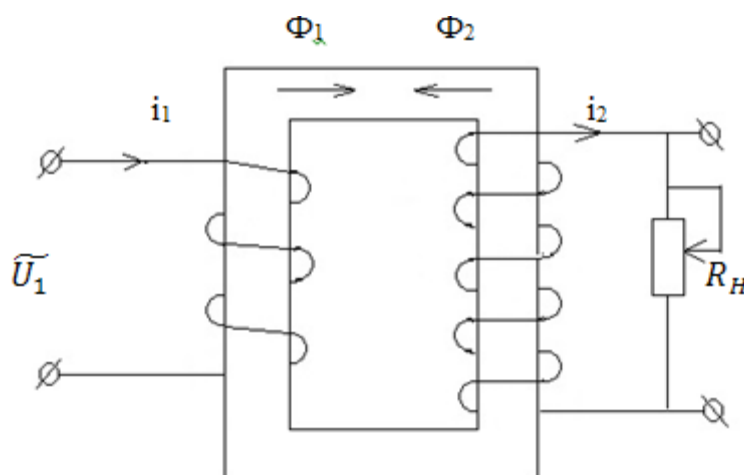


Рис. 28. Принцип работы трансформатора

При разомкнутой вторичной обмотке (W_2) ток в ней отсутствует, и она не создает никакого магнитного потока. Магнитный поток (Φ_1), пересекая витки первичной обмотки (W_1), наводит в ней ЭДС (E_1), которая действует встречно приложенному напряжению (U_1), и, следовательно, будет определяться разностью напряжений (U_1) и ЭДС (E_1), которая очень мала и определяется током холостого хода (током, необходимым для намагничивания сердечника или током намагничивания).

Принято допущение (см. п.п. 2.1.), что $U_1 \approx E_1$, а т.к. ЭДС зависит от величины магнитного потока и частоты, а напряжение в первичной обмотке постоянно, то, т.к. U и $f = \text{const}$ то и магнитный поток $\Phi \approx \text{const}$ (закон постоянства магнитного потока или закон постоянства потокосцепления).

Для пояснения этого закона рассмотрим процессы, происходящие в трансформаторе при изменении нагрузки (подключении вторичной обмотки к потребителям).

При подключении вторичной обмотки к потребителям в ней (обмотке W_2) потечет ток, который в свою очередь, наведет магнитный поток (Φ_2), направленный встречно магнитному потоку (Φ_1), следовательно, результирующий магнитный поток $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$.

При разомкнутой вторичной цепи i_2 и $\Phi_2 = 0$, $\Phi = \Phi_1$

Пренебрегая падением напряжения на первичной обмотке $U_1 \approx E_1$, получим постоянный результирующий магнитный поток или $\Phi \approx \text{const}$.

В нашем случае (при включении в нагрузку) для поддержания $\Phi \approx \text{const}$, должен увеличиться магнитный поток Φ_1 , для чего увеличивается ток (i_1) в первичной обмотке (W_1).

Иными словами, увеличение тока во вторичной обмотке (i_2) вызовет увеличение магнитного потока Φ_2 в этой обмотке, который будет направлен встречно магнитному потоку Φ_1 , а т.к. результирующий магнитный поток изменяться не может: $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \text{const}$, следовательно, магнитный поток первичной обмотки (W_1) должен также увеличиться, а для его создания нужно увеличить ток (i_1) в первичной обмотке (W_1).

Логическая схема этого процесса:

$$i_2 \uparrow \Rightarrow \Phi_2 \uparrow \Rightarrow \Phi_1 \uparrow \Rightarrow i_1 \uparrow (\text{т.к. } \Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \text{const})$$

Следовательно, всякое изменение нагрузки (тока) во вторичной обмотке вызовет изменение нагрузки (тока) в первичной обмотке.

2.3. Обозначение трансформаторов в электрических схемах

Обычно в электрических схемах трансформатор обозначается, как показано на рисунке 29, где:

- 1 – сердечник (магнитопровод трансформатора);
 2 – обмотки трансформатора: первичная и вторичная, в зависимости от того какая из них подключена к источнику питания, а какая к потребителю.

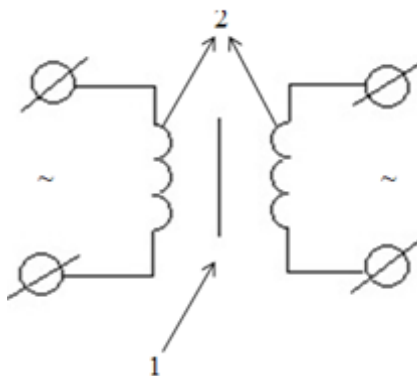
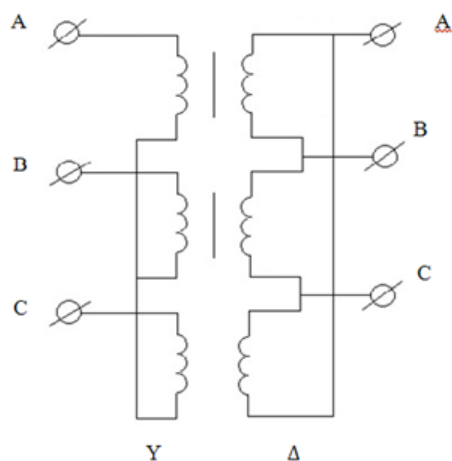


Рис. 29. Обозначение трансформатора в электрических схемах



2.4. Типы трансформаторов

2.4.1. Однофазные трансформаторы

Принцип работы однофазных трансформаторов рассмотрен ранее в п.п. 2.1. и 2.2. Для трансформации трехфазного тока можно использовать и однофазные трансформаторы, как показано на рисунке 30.

Рис.30 Использование однофазных трансформаторов в сети трехфазного тока

Эти трансформаторы, в зависимости от входных параметров напряжения (первичная обмотка), и необходимых нам параметров на выходе (вторичная обмотка), могут соединяться, как звездой (Y), так и треугольником (Δ). Т.е., возможны соединения Y/Y, Y/Δ (как показано на рис. 30), Δ/Δ, Δ/Y

2.4.2. Трехфазные трансформаторы

Недостатком использования однофазных трансформаторов в сети трехфазного тока являются большие затраты трансформаторной стали на сердечники трех трансформаторов.

Если обмотки однофазных трансформаторов расположить на одном сердечнике, то получим трехфазный трансформатор, при этом затраты трансформаторной стали на один трехфазный трансформатор значительно меньше, чем на три однофазных трансформатора. Стандартные схемы соединения обмоток трансформатора: Y/Y, Y/Δ, Δ/Δ, Δ/Y.

Приблизительная схема устройства трехфазных трансформаторов показана на рисунке 31.

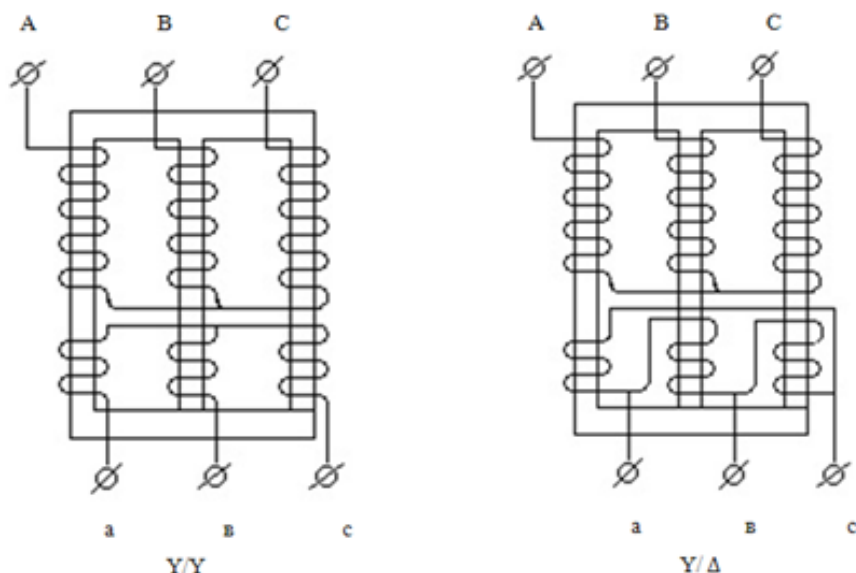


Рис. 31. Приблизительная схема устройства трехфазных трансформаторов

2.4.3. Автотрансформаторы

Автотрансформатор – это трансформатор, на сердечнике которого имеется только одна обмотка, к которой одновременно подсоединены первичная и вторичная (см. рис. 32).

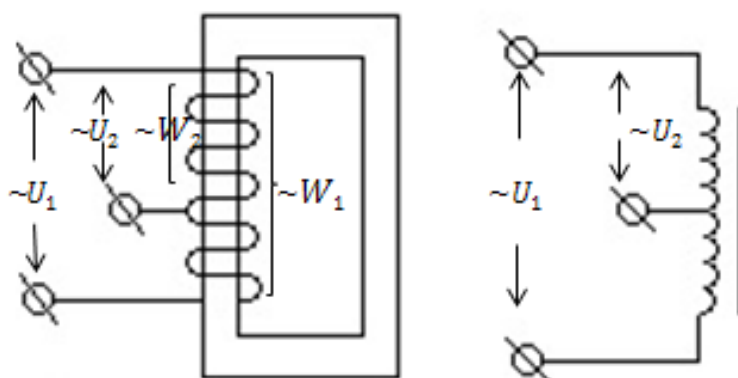


Рис. 32. Электрическая схема автотрансформатора

Так как ЭДС (E), индуцируемая в обмотке с числом витков W_1 , приблизительно равна приложенному напряжению (U), то ЭДС, индуцируемая в одном витке, равна:

$$\frac{E}{W_1} \approx \frac{U_1}{W_1}$$

Следовательно, чтобы получить нужное нам выходное напряжение, необходимо $\frac{U_1}{W_1}$ - ЭДС, вырабатываемую одним витком обмотки, умножить на количество витков второй обмотки, т.е. $\frac{U_1}{W_1} \times W_2$, или $E_2 \approx U_2 \approx \frac{U_1}{W_1} \times W_2$; $U_2 \approx U_1 \times \frac{W_2}{W_1}$ или, т.к. коэффициент трансформации $K = \frac{W_2}{W_1}$, $U_2 = \frac{U_1}{K}$.

Например: Входное напряжение автотрансформатора – 1000 В, полное число витков обмотки автотрансформатора – 100. Нам необходимо получить на выходе

автотрансформатора напряжение 400 В. ЭДС, индуцируемая одним витком обмотки, будет равна $\frac{U_1}{W_1} = \frac{1000}{100} = 10\text{В}$.

Так как нам необходимо получить выходное напряжение $U_2 = 400\text{В}$, то, для того чтобы найти количество витков, которое обеспечит нам такое напряжение, нужно: $W_1 = \frac{U_1}{10}$, и получим $W = \frac{400}{10} = 40$ витков.

Решим другим способом: т.к. $U_2 \approx U_1 \times \frac{W_2}{W_1}$ или $U_2 \approx U_1 \times \frac{W_2}{W_1} \Rightarrow W_2 = \frac{U_2 \times W_1}{U_1}$, подставив значения, получим $W_2 = \frac{400 \times 100}{1000} = 40$ витков.

Наряду с понижающими (рассмотренными выше) автотрансформаторами есть и повышающие автотрансформаторы (см. рис. 33).

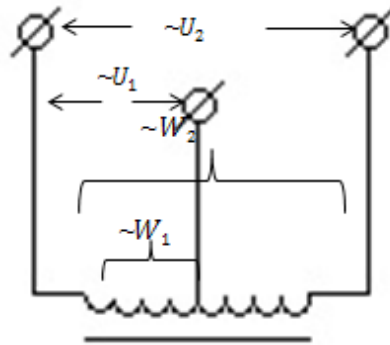


Рис. 33. Схема повышающего автотрансформатора

Принцип работы повышающего автотрансформатора аналогичен принципу действия понижающего автотрансформатора.

Коэффициент трансформации повышающего трансформатора такой же, как и у обычных (понижающих) трансформаторов:

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

В трехфазных сетях применяются трехфазные автотрансформаторы (см. рис. 34).

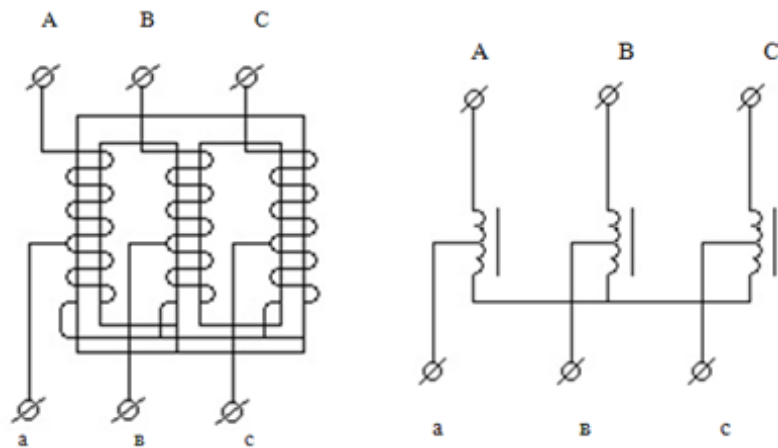


Рис. 34. Схема трехфазного автотрансформатора

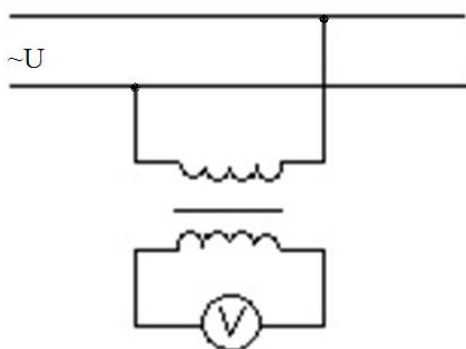


Рис. 35. Схема включения трансформатора напряжения

2.4.4. Измерительные трансформаторы

Непосредственное включение электроизмерительных приборов в сеть высокого напряжения делает небезопасным их обслуживание, при этом должны увеличиваться габариты приборов, и, как следствие, больше потерь энергии приходится на измерения.

Поэтому электроизмерительные приборы обычно включают в сеть через измерительные трансформаторы, позволяющие к тому же расширять пределы измерений самих приборов.

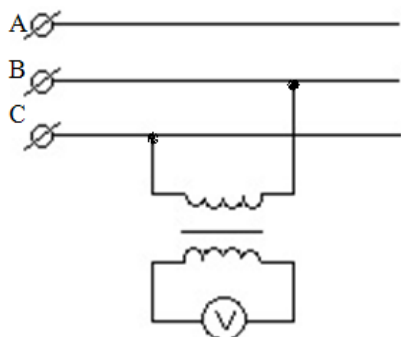
Различают измерительные трансформаторы напряжения и измерительные трансформаторы тока. Схема включения трансформатора напряжения показана на рис. 35.

2.4.4.1. Измерительные трансформаторы напряжения

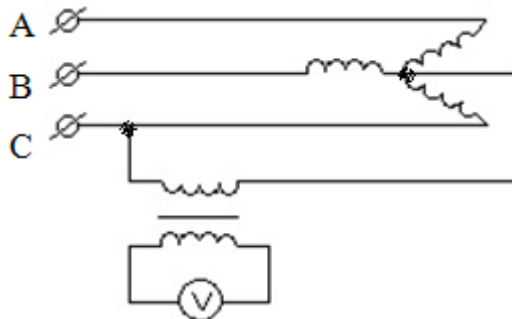
Чтобы определить величину высокого напряжения, нужно показания вольтметра умножить на коэффициент трансформации:

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Чтобы не производить вычисления, шкалы вольтметров градуируют заранее совместно с трансформатором, и тогда вольтметр будет показывать сразу величину высокого напряжения.



А) для измерения линейного напряжения



Б) для измерения фазного напряжения

Рис. 36. Схема включения однофазного измерительного трансформатора напряжения в сеть трехфазного тока

Примечание: Вторичная обмотка питает энергией исключительно обмотки измерительных приборов: вольтметров, ваттметров, фазометров, счетчиков, реле напряжений, реле мощностей и др. (см. рис. 35).

Схема включения однофазного измерительного трансформатора напряжения в сеть трехфазного тока показана на рисунке 36.

В сетях трехфазного тока для измерительных целей применяют также трехфазные трансформаторы напряжения (см. рис. 37).

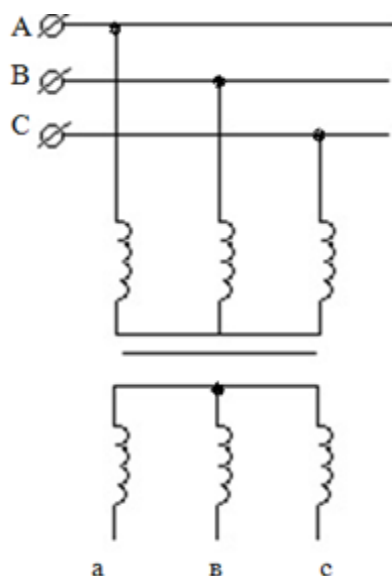


Рис. 37. Схема трехфазного трансформатора напряжения

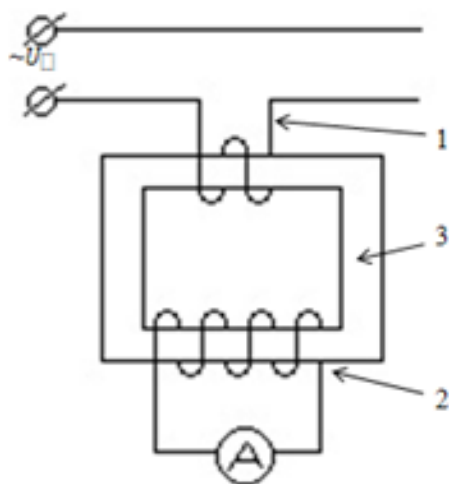


Рис. 38. Принципиальная схема измерительного трансформатора тока

2.4.4.2. Измерительные трансформаторы тока

Первичная обмотка трансформатора тока включена последовательно в сеть (см. рис. 38), где:

- 1 – первичная обмотка;
- 2 – вторичная обмотка;
- 3 – сердечник (магнитопровод).

Во вторую цепь трансформаторов тока включаются измерительные приборы (амперметры, обмотки ваттметров, счетчиков, фазометров, токовые реле и т.п.).

Для того, чтобы приборы, включенные во вторичную обмотку трансформатора тока, показали величину первичного тока, их шкалы градуируют с учетом коэффициента трансформации.

А) Особенности токовых трансформаторов

Силовые трансформаторы и измерительные трансформаторы напряжения, включенные в сеть параллельно, составляют независимую цепь.

В трансформаторе тока первичная обмотка, включенная в цепь последовательно, является частью электрической цепи, по которой протекает ток, определенный напряжением первичной цепи и сопротивлением нагрузки. Этот ток вторичная обмотка изменить не в состоянии.

При замкнутой вторичной обмотке протекает ток I_2 , создающий магнитный поток Φ_2 , направленный против магнитного потока Φ_1 первичной обмотки. Вследствие этого по сердечнику трансформатора проходит магнитный поток $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$. На величину результирующего магнитного потока и рассчитано сечение стального магнитопровода, т.е. сердечника.

При разомкнутой вторичной цепи трансформатора тока $I_2 = 0$, следовательно $\Phi_2 = 0$, Φ - результирующий магнитный поток сердечника резко возрастет и станет равным $\Phi = \Phi_1$, а значительно увеличившийся магнитный поток сердечника будет нагревать его и, тем самым, разрушать изоляцию обмоток трансформатора и выводить его из строя. Кроме того, резко увеличившийся магнитный поток (Φ) будет индуцировать во вторичной обмотке большую ЭДС, что может привести к пробое изоляции и увеличению вероятности поражения электрическим током.

Поэтому во время работы измерительного трансформатора тока нельзя размыкать его вторичную обмотку! Нельзя включать предохранители в цепь вторичной обмотки, т.к. сгорание предохранителя вызовет разрыв цепи.

Б) Классификация трансформаторов тока

В зависимости от числа витков первичной обмотки трансформаторы тока могут быть одновитковыми и многовитковыми.

В зависимости от числа вторичных обмоток трансформаторы тока могут быть однообмоточными и двухобмоточными.

У одновитковых трансформаторов тока первичной обмоткой, как правило, является шина или провод, в котором замеряется ток.

Примером однообмоточного трансформатора являются измерительные клещи (см. рис. 39).



Рис. 39. Измерительные клещи

В) Схемы включения трансформатора тока (см. рис. 40 и 41)

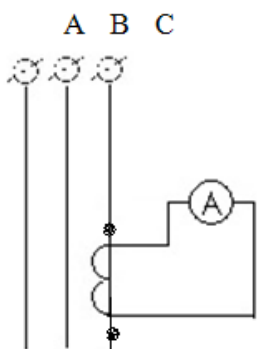


Рис. 40. Схема включения амперметра с помощью трансформатора тока для измерения тока одной фазы

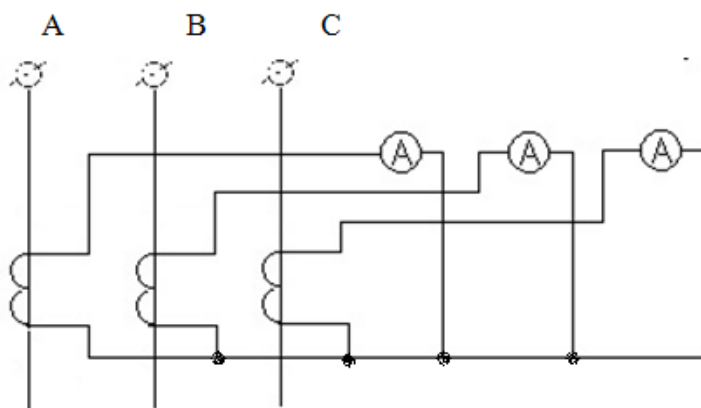


Рис. 41. Схема включения трех амперметров с помощью трансформаторов тока для измерения токов трехфазной системы

3. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором

3.1. Создание вращающегося магнитного поля

На статор электрической машины намотаем три катушки, сдвинутые относительно друг друга на 120° (см. рис. 42) и пропустим по ним трехфазный переменный ток. При этом считаем положительным направлением тока, когда он течет от начала к концу катушек.

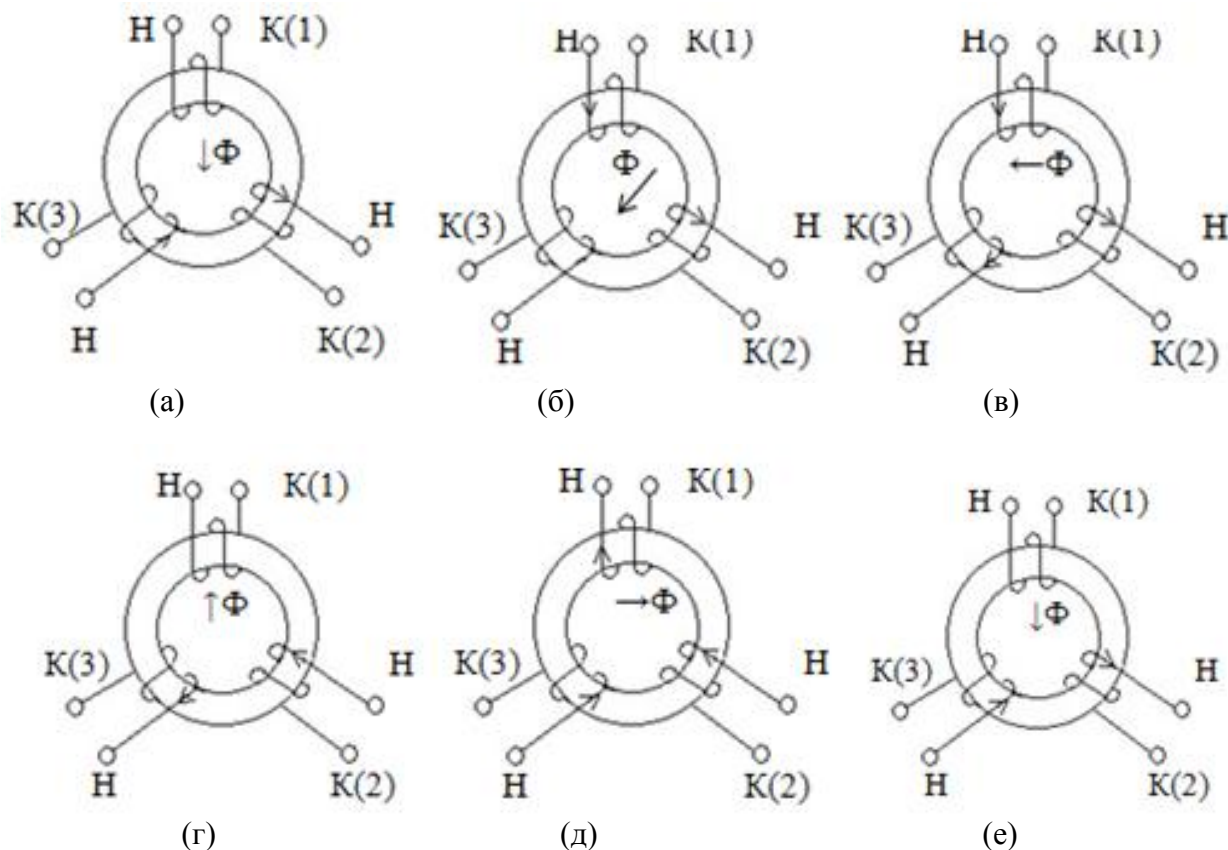


Рис. 42. Направления токов в катушках каждой фазы

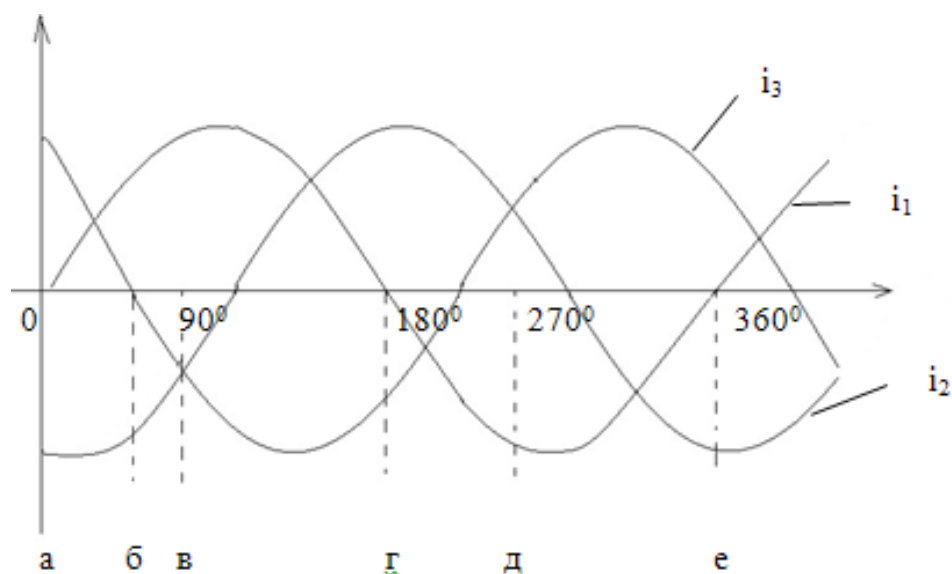


Рис. 43. Кривые изменения трехфазного переменного тока

На рисунке 42 показаны направления токов в катушках каждой фазы. Направление магнитного потока определяем по правилу буравчика. Направление результирующего магнитного потока (Φ) показано вектором.

На рисунке 43 показаны кривые изменения трехфазного переменного тока.

В положении (а) – ток фазы (1) = 0, ток фазы (2) имеет отрицательное значение, ток фазы (3) – положительное значение.

Разбирая различные положения от (а) до (е), отмеченные на рисунках 42 и 43, находя направления токов которой фазы и получая результирующий магнитный поток Φ , мы видим, что положение вектора (Φ) в пространстве меняется (магнитный поток Φ вращается, в нашем случае по часовой стрелке).

Таким образом, внутри статора образуется вращающееся магнитное поле, которое используется в работе асинхронных двигателей, синхронных двигателей и генераторов, а так же в некоторых приборах автоматики.

3.2. Принцип работы асинхронных двигателей

Работа асинхронного двигателя основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля обмотки статора и токов, индуцированных в роторе.

При протекании переменного трехфазного тока по обмотке статора электродвигателя создается вращающееся магнитное поле, которое пересекает обмотку ротора и индуцирует в ней ЭДС, так же как во вторичной обмотке трансформатора. Так как обмотка статора замкнута накоротко, или через какое либо сопротивление, то по ней пойдет электрический ток. Этот ток ротора, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создает вращающий момент ротора и он начинает вращаться.

Работа асинхронного электродвигателя похожа на работу трансформатора. Первичной обмоткой здесь является обмотка статора, а вторичной – обмотка ротора (разница в наличии вращающейся части – ротора и воздушного зазора между ротором и статором).

Совершенно очевидно, что скорость вращения ротора (n) должна быть больше скорости вращения поля статора (n_0). Иначе вращающееся магнитное поле не будет пересекать проводники обмотки ротора, вращающегося с той же скоростью, и, соответственно, в роторе не появятся ЭДС и токи, а, следовательно, в электродвигателе не возникнет вращающий момент.

Т.е., в асинхронном электродвигателе для создания ЭДС и токов в роторе, а, следовательно, и вращающего момента необходимо, чтобы скорость вращения ротора (n) была меньше скорости вращения магнитного поля статора (n_0).

Тогда вращающееся магнитное поле статора будет пересекать проводники обмотки ротора со скоростью $n_0 - n$. При пуске, когда $n = 0$, эта скорость будет равна n_0 , а по мере разгона электродвигателя она будет уменьшаться.

Число, которое показывает, во сколько раз относительная скорость ротора (скорость относительно скорости магнитного поля статора $n_0 - n$) меньше скорости вращающегося магнитного поля статора (n_0) называется скольжением (S):

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

Скорость вращения магнитного поля статора называется синхронной скоростью и определяется по формуле:

$$n_0 = \frac{60 \times f}{P},$$

где n_0 – синхронная скорость (скорость вращения магнитного поля статора), об/мин;

f – частота питающей сети, Гц;

P – число пар полюсов в обмотке статора.

Так как скорость вращения ротора отстает от скорости вращения поля статора (синхронной скорости), то такие двигатели получили название асинхронных.

Исходя из формулы:

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

число оборотов асинхронного двигателя будет равно:

$$n = n_0 \times (1 - S) \text{ или } n_0 = \frac{60 \times f}{p} \times (1 - S).$$

Момент вращения асинхронных двигателей зависит от величины вращающегося магнитного потока статора (Φ) и тока обмотки ротора (I_R) и φ_R (φ_R – угол отставания тока ротора от напряжения (ЭДС) ротора). Следовательно:

$$M_{\text{вр}} = \Phi \times I_R \times \cos \varphi_R \text{ или } M_{\text{вр}} = C'_M \times \Phi \times I_R \times \cos \varphi_R,$$

где $M_{\text{вр}}$ – вращающий момент;

Φ – вращающийся магнитный поток статора;

I_R – ток ротора;

$\cos \varphi_R$ – коэффициент мощности ротора.

В установившемся режиме работы вращающий момент должен быть равен моменту сопротивления. Иначе двигатель будет разгоняться или тормозиться, т.е. $M_{\text{вр}} = M_{\text{сопр}}$. При увеличении момента сопротивления ($M_{\text{сопр}}$) уменьшается скорость вращения ротора (n). Скорость вращения поля статора n_0 остается постоянной, следовательно, увеличится разность ($n_0 - n$), увеличится скольжение ($S = \frac{n_0 - n}{n_0}$), следовательно, увеличится ЭДС ротора и ток ротора, увеличится вращающий момент, пока не станет равным $M_{\text{сопр}}$, увеличатся и обороты (скорость) ротора.

Логическая схема данного процесса:

$$M_{\text{сопр}} \uparrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow S \uparrow \Rightarrow E_R \uparrow \Rightarrow I_R \uparrow \Rightarrow M_{\text{вр}} \uparrow \Rightarrow n \uparrow$$

3.3. Основные виды асинхронных электродвигателей

Основными видами асинхронных электродвигателей являются:

1. асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, как их разновидность можно рассматривать двигатели с массовым и двухслойным ротором;
2. асинхронные электродвигатели с фазным ротором.

3.3.1. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором

Для уменьшения вихревых токов статоры всех электрических машин и сердечники трансформаторов делают из отдельных стальных листов толщиной 0,35 – 0,5 мм, эти листы изолированы друг от друга тонкой бумагой или лаком и стянуты болтами, изолированными от статора.

Ротор асинхронного двигателя также собирают из отдельных листов стали. В пазы ротора закладываются стержни (1), которые с двух сторон прижимаются к медным кольцам по принципу «беличья клетка» (см. рис. 44).

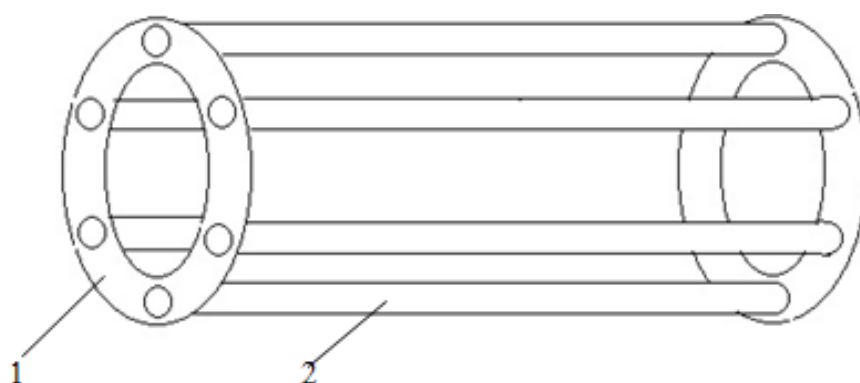


Рис. 44. Ротор «Беличья клетка»

1 – медные стержни;

2 – медные кольца.

Принцип работы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором рассмотрен ранее в п. 3.2.

Достоинства асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором:

1. простота и дешевизна конструкции;
2. возможность большей перегрузки;
3. простота пуска и возможность его автоматизации;
4. относительно малая чувствительность к нагрузке (малая зависимость скорости (оборотов) при изменении нагрузки);
5. более высокие, чем у электродвигателей с фазным ротором, КПД и $\cos\varphi$ (за исключением электродвигателей с массивным ротором) (см. п.п. 3.3.3.).

Недостатки асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором:

1. большой пусковой ток;
2. сложность в регулировании числа оборотов (скорости);
3. чувствительность к колебаниям напряжения;
4. низкий $\cos\varphi$ при малых моментах сопротивления.

3.3.2. Асинхронные электродвигатели с фазным ротором

Два первых недостатка: большой пусковой ток и сложность в регулировании оборотов - привели к тому, что наряду с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором применяются асинхронные электродвигатели с фазным ротором.

Статоры электродвигателя с фазным и короткозамкнутым ротором идентичны. Однако у электродвигателя с фазным ротором на роторе размещены три фазовых обмотки, соединенные между собой звездой (иногда «треугольником»). Концы фазовых обмоток ротора соединяются с медными контактными кольцами, находящимися на валу ротора. К контактным кольцам через угольные щетки присоединено пуско-регулирующее сопротивление (см. рис. 45), где: R – пуско-регулирующие сопротивления; 1 – контактные кольца; 2 – угольные щетки.

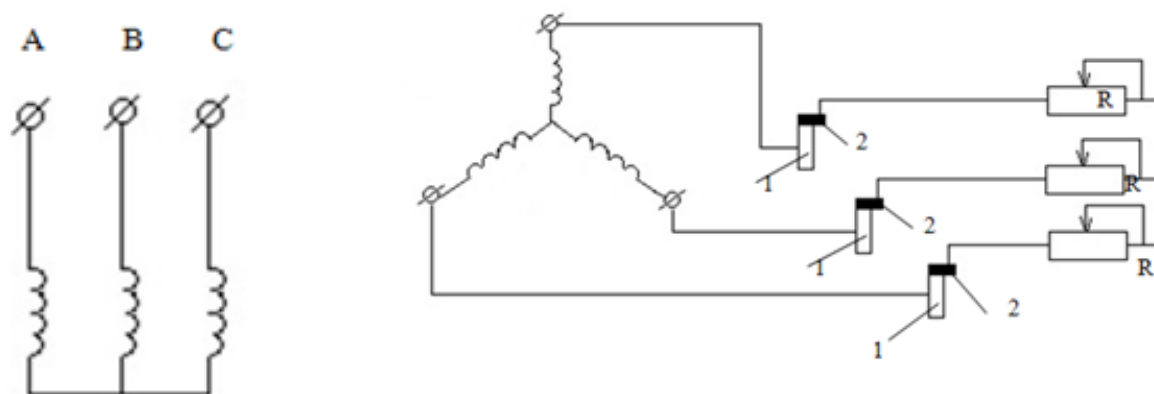


Рис. 45. Схема электродвигателя с фазным ротором

Увеличивая сопротивление ротора, мы уменьшаем его ток, следовательно, как и в трансформаторе, будет уменьшаться ток статора, тем самым уменьшая пусковой ток двигателя.

Однако, увеличивая активное сопротивление ротора, мы увеличиваем активную составляющую его сопротивления (Z_R), и тем самым, увеличится $\cos\varphi_R$, следовательно, увеличится и вращающий момент ротора.

Следовательно, вводя при пуске в цепь ротора активное сопротивление, мы уменьшаем пусковой ток и увеличиваем пусковой вращающий момент.

Достоинства асинхронных электродвигателей с фазным ротором:

1. меньший пусковой ток;
2. большой пусковой вращательный момент;
3. возможность плавного регулирования числа оборотов (скорости);
4. возможность большой перезагрузки;
5. относительно малая чувствительность к нагрузке (малая зависимость числа оборотов от изменения нагрузки).

Недостатки асинхронных электродвигателей с фазным ротором:

1. чувствительность к колебаниям напряжения;
2. низкий $\cos\varphi$ при малых нагрузках;
3. КПД и $\cos\varphi$ меньший, чем у электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

3.3.3. Способы пуска асинхронного электродвигателя

Закон Ома для работающего электродвигателя переменного тока ($I_a = \frac{v - C_e \cdot \Phi \cdot n}{R_a}$) верен только для мгновенных значений тока и комплексных значений. Кроме того, т.к. ток переменной обмотки электрической машины будет обладать еще и реактивным (индуктивным) сопротивлением, вместо R_a появится Z_a - полное сопротивление якоря машины. И для мгновенных значений тока формула закона Ома примет вид: $I_a = \frac{v - C_e \cdot \Phi \cdot n}{Z_a}$, а, т.к. при пуске $n=0$, то $I_a = \frac{v}{Z_a}$.

Из формулы видно, что для уменьшения пускового тока необходимо: либо уменьшить величину подводимого напряжения, либо ввести добавочное сопротивление в цепь якоря (статора) (1), что для асинхронных электродвигателей одно и то же.

Уменьшение величины подводимого напряжения осуществляется различными способами, наиболее распространенный из них – метод переключения со «звезды» на «треугольник».

А) Пуск методом переключения со «звезды» на «треугольник»

Первоначально обмотки электродвигателя соединяются «звездой», а по достижении необходимых оборотов переключается на «треугольник».

При соединении «звездой» фазное напряжение ($U_{\text{ф}}$) равно $U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$ (где $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение).

Фазный ток $I_{\text{ф}}$ равен $I_{\text{л}}$ (линейный ток) т.е. $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. Из этого делаем вывод:

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} \times Z}$$

При соединении «треугольником» $\Delta U_{\text{л}} = \Delta U_{\text{ф}}$;

$$I_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\text{а}}} = \frac{U_{\text{л}}}{Z_{\text{а}}}, \text{ а } \Delta I_{\text{л}} = \Delta I_{\text{ф}} \times \sqrt{3}, \text{ или, подставив значения } \Delta I_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{Z_{\text{а}}}; \Delta I_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} \times U_{\text{л}}}{Z_{\text{а}}}$$

Теперь определяем, во сколько раз уменьшится пусковой ток при таком способе пуска в результате сокращений $U_{\text{л}}$ и $Z_{\text{а}}$:

$$\frac{\Delta I_{\text{л}}}{I_{\text{л}}} = \frac{\sqrt{3} \times U_{\text{л}} / Z_{\text{а}}}{U_{\text{л}} / \sqrt{3} \times Z_{\text{а}}} = \sqrt{3} \times \sqrt{3} = 3 \text{ (раза).}$$

Т.е., в результате пуска методом переключения со «звезды» на «треугольник» пусковой ток уменьшится в 3 раза.

Б) Пуск способом ввода добавочного сопротивления в цепь ротора (для электродвигателей с фазным ротором).

В) Прямой пуск асинхронного электродвигателя возможен только для электродвигателей относительно небольшой мощности, чтобы не допустить при пуске провала напряжения сети, т.к. наряду с активным сопротивлением якорь машины переменного тока обладает еще и индуктивным сопротивлением, что ограничивает величину пускового тока. Кроме того, у асинхронных электродвигателей отсутствует щеточно-коллекторный аппарат.

3.3.4. Регулирование скорости асинхронного двигателя

Согласно формуле скорость (число оборотов) асинхронного двигателя равна:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} \cdot (1 - S)$$

Из формулы видно, что скорость (число оборотов) асинхронного электродвигателя можно менять, изменяя частоту питающей силы (f), число пар полюсов (P) или величину скольжения.

Поэтому регулирование скорости (числа оборотов) асинхронного электродвигателя осуществляется тремя способами:

А) изменением частоты питающей сети;

Б) изменением числа пар полюсов;

В) изменением величины скольжения (S), а для двигателей с фазным ротором изменением сопротивления ротора (введением добавочного сопротивления в цепь ротора).

А) При этом способе регулирования изменение частоты осуществляется, как при помощи источника питания (генератора, а также привода генератора), что встречается в некоторых видах гребных электрических установок (ГЭУ), так и при помощи специальных преобразователей. В настоящее время этот способ приобрел наибольшее распространение.

Б) Регулирование скорости (числа оборотов) изменением числа пар полюсов применяется в основном для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, т.к. у электродвигателей с фазным ротором в этом случае обмотку ротора пришлось бы переключать, что усложняет схему электродвигателя. При регулировании изменением числа пар полюсов изменение скорости происходит скачками, т.е. отсутствует

плавность регулирования. Так при промышленной частоте 50Гц, скорость может составлять 3000 об/мин (одна пара полюсов), 1500 об/мин (две пары полюсов), 1000 об/мин (три пары полюсов), 750 об/мин (четыре пары полюсов), 600 об/мин (пять пар полюсов) и т.д.

В) При введении добавочного сопротивления в цепи ротора ток ротора уменьшается, следовательно, уменьшается и вращающий момент электродвигателя (см. п. 3.2.

$$M_{вр} \equiv \Phi \cdot I_R)$$

Т.к. вращающий момент станет меньше момента сопротивления, то двигатель начнет тормозиться, и уменьшится число оборотов. Увеличится скольжение, а следовательно, и ЭДС ротора (E_R), которое вызовет увеличение тока ротора и вращающего момента, пока момент вращения не станет равным моменту сопротивления, но уже при меньших оборотах электродвигателя.

Логическая схема этого процесса:

$R_p \uparrow \Rightarrow I_R \downarrow \Rightarrow M_{вр} \downarrow \Rightarrow n \downarrow \Rightarrow S \uparrow \Rightarrow E_R \uparrow \Rightarrow I_R \uparrow \Rightarrow M_{вр} \uparrow$ - пока не станет равномерным $M_{сопр}$, но уже при меньшей n и большей S .

Следовательно, каждое увеличение сопротивления в цепи ротора вызовет увеличение скольжения или уменьшение оборотов асинхронного двигателя.

3.3.5. Реверс (изменение направления вращения) асинхронного электродвигателя

Направление вращения ротора асинхронного электродвигателя зависит от направления вращения магнитного поля статора. Чтобы изменить направление вращения магнитного поля статора, нужно поменять местами две любые питающие фазы электродвигателя.

3.3.6. Принцип обратимости асинхронного электродвигателя. Физический смысл тормозных режимов

Наиболее ярко принцип обратимости асинхронного электродвигателя проявляется в тормозных режимах (динамическом, генераторном и торможении противовключением), которые будут рассмотрены более подробно в МДК 01.01 «Судовые электропроводы».

Физический смысл этого принципа у асинхронного двигателя заключается в том, что мгновенные значения токов статора меняют свое направление, т.е. происходит сдвиг по фазе на 180° или изменение направления мощности, а, следовательно, и электродвигательного момента.

4. Трехфазные синхронные машины

Как и всякая электродвигательная машина, синхронная машина обладает свойством обратимости, т.е. при определенных условиях может работать как генератор, так и электродвигатель.

4.1. Трехфазные синхронные генераторы

Принцип работы трехфазного синхронного генератора с одной парой полюсов показан на рисунке 46.

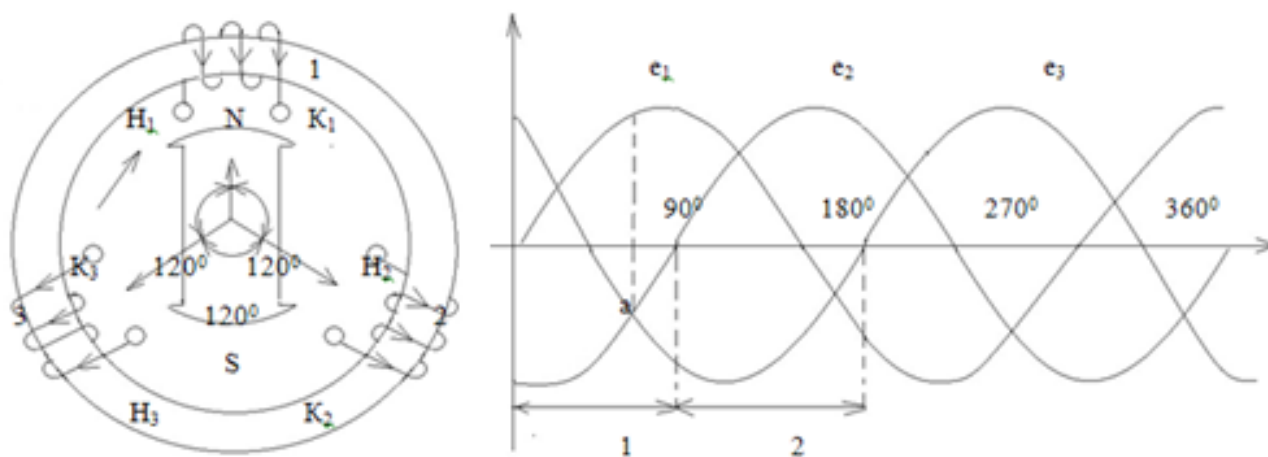


Рис. 46. Принцип работы трехфазного синхронного генератора с одной парой полюсов (1 и 2 – сдвиг по фазе на $1/3T$ или 120°)

На статоре генератора намотаны три обмотки с одинаковым числом витков, сдвинутые на 120° (для машины с одной парой полюсов). Н и К – начала и концы обмоток. На графике справа показаны кривые изменения индуцированных ЭДС. Положение, в котором находится синхронная машина, на левой части рисунка отмечено пунктирным отрезком а-е? В это время катушка 1 находится под серединой северного полюса электромагнита (ротора), и величина индуцированной в ней ЭДС (e_1) имеет максимальное значение. ЭДС (по правилу «правой руки») будет направлена от начала катушки к концу. Это направление и принимается как положительное.

В это же время во 2-ой катушке ЭДС отстает по фазе от ЭДС 1-ой катушки на $1/3 T$ (периода), а ЭДС 3-й катушки отстает от ЭДС 2-ой катушки также на $1/3$ периода. Вторая и третья катушки находятся в зоне действия южного полюса (S) электромагнита, следовательно, ЭДС в них будет направлена от конца катушек к началу – это направление принимается как отрицательное.

Соединив начала и концы этих трех обмоток соответствующим образом («звездой» или «треугольником»), получим трехфазную переменную ЭДС – показанную на рис. 46 (правая часть).

Следовательно, трехфазная ЭДС – это совокупность трех однофазных ЭДС одинаковой частоты, сдвинутых относительно друг друга на 120° . ЭДС в каждой фазе обмотки якоря синхронного генератора при холостом ходе будет равна:

$$I_{\text{нагрузки}} = 0; E_0 = C_e \times \Phi \times n,$$

где C_e – коэффициент (постоянная величина, зависящая от конструкции машины);

Φ – магнитный поток ротора (обмотки возбуждения);

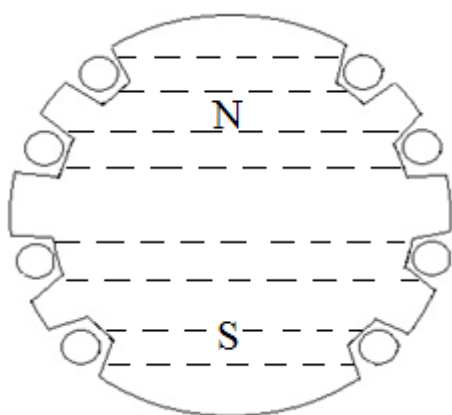
n – число оборотов (скорость) генератора (об/мин).

4.1.1. Явнополюсные и неявнополюсные генераторы

Как известно (см. п. 3.2.) синхронная скорость $n_0 = \frac{60 \times f}{P}$, промышленная частота тока составляет 50 Гц ($f=50$ Гц), следовательно, число оборотов (скорость) синхронного генератора должна составить (в зависимости от числа пар полюсов) $P = 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500$ и т.д. об/мин.

Для синхронных машин со скоростью меньше 3000 об/мин, т.е. 1500, 1000, 750 и т.д., применяются явнополюсные роторы (см. рис. 46).

Для высокооборотных синхронных машин применяются неявнополюсные роторы (см. рис. 47).



Такие роторы обладают большой механической прочностью (против центробежных сил), и кроме того, при больших скоростях вращения имеют меньшее трение о воздух, следовательно, меньше потерь и больший КПД.

Рис. 47. Неявнополюсный ротор

4.1.2. Реакция якоря синхронной машины

Воздействие магнитного потока якоря на результирующий магнитный поток синхронной машины называется реакцией якоря. Рассмотрим это явление на примере синхронного генератора.

Так как под воздействием реакции якоря изменяется результирующий магнитный поток генератора, то и результирующая ЭДС, а, следовательно, результирующее напряжение генератора будет зависеть от величины тока, проходящего по обмотке якоря и сдвига фаз этого тока относительно напряжения (угла φ или коэффициента мощности – $\cos\varphi$). Когда ток в обмотке якоря совпадает с ЭДС холостого хода, магнитный поток реакции якоря ($\Phi_{рЯ}$) действует по поперечной ротора ($\Phi_{\text{в}}$), размагничивая одну половину каждого полюса и намагничивая другую. Т.е. магнитный поток машины несколько искажается, а, вследствие насыщения магнитной цепи машины несколько уменьшается (см. рис. 48 а).

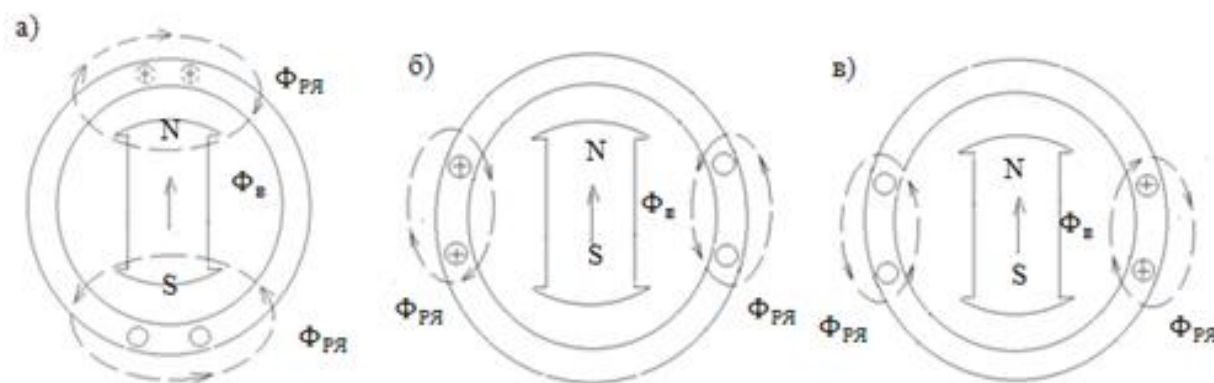


Рис. 48. Реакция якоря синхронного генератора в зависимости от характера нагрузки

В случае, когда ток в обмотке якоря отстает от ЭДС холостого хода на 90° (см. рис. 48 б), т.е. при чисто индуктивной нагрузке, магнитный поток реакции якоря ($\Phi_{рЯ}$) действует против магнитного потока ротора ($\Phi_{\text{в}}$), т.е. размагничивает машину.

В случае, когда ток в обмотке якоря опережает ЭДС холостого хода на 90° (рис. 48 в), т.е. при чисто емкостной нагрузке, магнитный поток реакции якоря ($\Phi_{рЯ}$) совпадает по направлению с магнитным потоком ротора, т.е. намагничивает машину.

4.1.3. Внешние характеристики синхронного генератора

Кроме реакции якоря на величину выходного напряжения генератора влияет падение напряжения на якоре. Т.о., напряжение генератора зависит от величины и характера нагрузки и определяется:

$$U = E_0 - I_a \times Z_a \pm E_{ря},$$

где U – выходное напряжение;

E_0 – ЭДС холостого хода, вырабатываемая генератором при отсутствии нагрузки;

I_a – ток якоря;

Z_a – общее сопротивление обмотки якоря;

$E_{ря}$ – ЭДС, возникающая в результате действия реакции якоря.

Следовательно, внешние характеристики синхронного ротора $U = f(I_n)$ будут иметь вид, показанный на рис. 49.

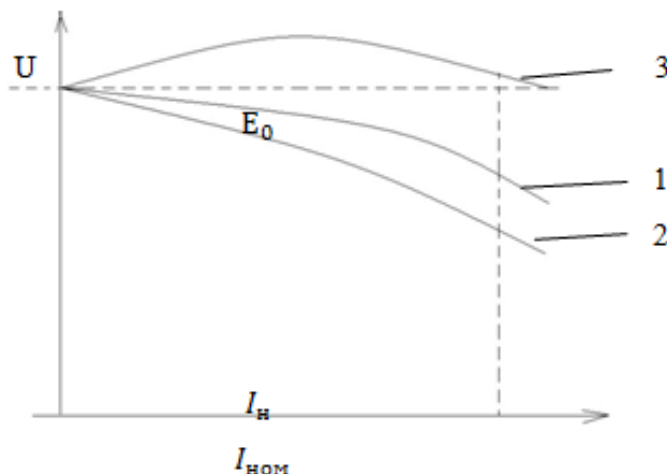


Рис. 49. Внешние характеристики синхронного ротора

1 – внешняя характеристика при активной нагрузке;

2 – внешняя характеристика при активно-индукционной нагрузке;

3 – внешняя характеристика при активно-емкостной нагрузке.

При активно-индукционной нагрузке (2) выходное напряжение будет изменяться (уменьшаться) значительно сильнее, чем при чисто активной нагрузке из-за размагничивающего действия реакции якоря.

При активно-емкостной нагрузке (3) выходное напряжение может даже возрастать (по сравнению с E_0) из-за размагничивающего действия реакции якоря.

Следовательно, для поддержания постоянства напряжения на выходе синхронного генератора необходима система автоматического регулирования напряжения (АРН), учитывающая не только величину тока нагрузки, но и его характер (активный, активно-индукционный, активно-емкостный), т.е. $\cos\varphi$. В настоящее время более распространенными АРН являются системы амплитудно-фазового компаундирования (АФК), которые будут изучены в МДК 01.01 «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы».

4.1.4. Включение синхронных генераторов в параллельную работу

Для включения синхронного генератора в параллельную работу с сетью (или с другим генератором) необходимо выполнение следующих условий:

1. совпадение порядка чередования фаз генератора и сети;
2. равенство ЭДС подключаемого генератора в напряжения сети;

3. равенство частот подключаемого генератора и сети;
4. мгновенные значения ЭДС подключаемого генератора и сети должны совпадать по фазе.

При работе синхронного генератора в параллель с сетью активная нагрузка на нем регулируется изменением величины вращающего момента на первичном двигателе.

Реакционная нагрузка регулируется величиной магнитного потока возбуждения с помощью изменения тока возбуждения ротора.

Более подробно эти вопросы будут изучены в МДК 01.01 «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы».

4.2. Трехфазные синхронные электродвигатели

Как любая электрическая машина синхронная машина обладает свойством обратимости. Например, синхронный генератор может перейти в двигательный режим, при работе в параллель с мощной сетью, если по каким-то причинам уменьшился или исчез вращающий момент его первичного двигателя.

Работа синхронной машины в данном случае показана на рисунке 50.

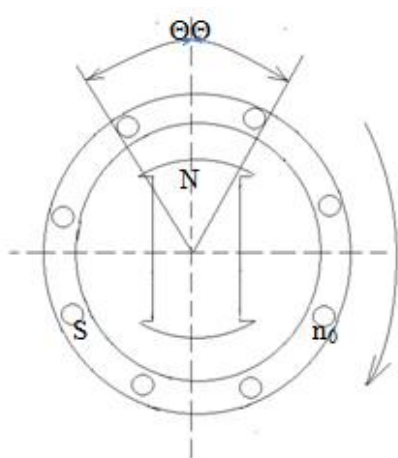


Рис. 50. Принцип работы синхронной машины

Вращение ротора в генераторном режиме происходит по часовой стрелке (n_0), при этом поле статора вращается в том же направлении и с той же скоростью (n_0). Однако, в генераторном режиме, поле ротора опережает поле статора на угол θ' и как бы тянет поле ротора за собой.

Если по какой-то причине произойдет уменьшение или исчезновение вращающего момента первичного двигателя, то вращающееся магнитное поле статора «подхватит» ротор синхронной машины и заставит его вращаться с той же скоростью n_0 и в том же направлении. При этом поле ротора будет отставать от вращающегося магнитного поля статора на угол θ .

4.2.1. Способы пуска синхронного двигателя

Пуск стоящего синхронного двигателя путем простого подключения питания на статор и ротор электродвигателя невозможен. Объясняется это тем, что магнитное поле статора, вращаясь с большой скоростью вокруг неподвижного ротора, не может заставить его вращаться. Так как ротор обладает значительной массой, соответственно, большой инерцией, он не сможет мгновенно тронуться с места и развить необходимое число оборотов.

Поэтому пуск синхронного электродвигателя возможен только при раскрутке его до подсинхронной скорости ($n \approx 0,95n_0$), что достигается:

1. раскруткой синхронного двигателя с помощью какого-либо другого механизма, как, например, в обратимых преобразователях;
2. наличием на роторе пусковой (асинхронной) обмотки.

В настоящее время, в связи с бурным развитием силовой преобразовательной техники (статических преобразователей), в нашем случае преобразователей частоты, все большее распространение получает частотный пуск синхронных двигателей.

1. Пуск путем раскрутки синхронного двигателя при помощи вспомогательного двигателя.

С помощью вспомогательного двигателя синхронная машина раскручивается до синхронной скорости, при этом она работает как генератор. Затем, выполнив условия включения генератора в параллельную работу (см. п. 4.1.4.), включают синхронную машину в сеть. Затем, уменьшив вращающий момент вспомогательного двигателя или вообще отключив его, синхронную машину переводят из генераторного в двигательный режим, т.е. она начнет работать как двигатель.

2. Пуск при помощи пусковой (асинхронной) обмотки.

Для осуществления этого способа на роторе синхронной машины укладывается дополнительная замкнутая (асинхронная) обмотка.

Пуск производят так же как пуск асинхронного электродвигателя. При достижении двигателем подсинхронной скорости ($n \approx 0,95n_0$) подается напряжение на синхронную обмотку ротора, и электродвигатель начинает вращаться с синхронной скоростью (входит в синхронизм).

4.2.2. Частотный пуск, частотное регулирование и реверс синхронного электродвигателя

Современные технические средства позволяют не только регулировать частоту питающей сети ($n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$), но и время выключения в зависимости от положения ротора синхронной машины. Примером таких машин могут служить синхронные гребные электродвигатели на атомных ледоколах «Таймыр» и «Вайгач».

При уменьшении частоты пропорционально уменьшается и скорость вращения поля статора ($n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$). Следовательно, при малых частотах (малой частоте вращения поля статора) вращающееся магнитное поле успевает провернуть (сдвинуть с места) ротор синхронного двигателя. Затем, постепенно увеличивая частоту, а, следовательно, и скорость вращения поля статора, увеличивается и число оборотов (скорость) ротора синхронной машины.

По такому же принципу происходит и регулирование числа оборотов синхронного двигателя. Т.к., $n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$, при изменении частоты, пропорционально изменяется и скорость синхронного двигателя.

Реверс синхронного двигателя так же осуществляется постепенным снижением числа оборотов за счет снижения частоты питающей сети. При нулевых оборотах ($f = 0$) изменяется порядок чередования фаз, и затем происходит последующий разгон электродвигателя в другую сторону до нужной скорости.

Примечание: исходя из описанных ранее особенностей синхронного двигателя (см. п. 4.2.1.) обычный реверс (простым изменением порядка чередования фаз) и регулирование оборотов синхронного двигателя простым изменением числа пар полюсов невозможны!

4.3. Синхронные компенсаторы

Если в синхронном генераторе, работающем в параллель с мощной сетью, увеличить ток возбуждения (магнитный поток ротора), то этот генератор начнет забирать на себя реактивную (индуктивную) нагрузку, увеличивая $\cos\varphi$ сети (см. п. 4.1.4.).

Это же явление используется и в синхронных электродвигателях. Если синхронный двигатель перевозбуждён, он работает как емкость, включенная в сеть (активно-емкостная нагрузка), увеличивая $\cos\varphi$ сети, т.е. не только производит механическую работу, но и улучшает $\cos\varphi$ сети. Такой электродвигатель работает в режиме синхронного компенсатора.

Список литературы

Основная литература

1. Кацман, М.М. Электрические машины: учебник для СПО/ М.М.Кацман.- 4-е изд., перераб. и доп.- Москва: Высшая школа, 2002.- 469 с.: илл.
2. Пиотровский, Л.М. Электрические машины: учебник/ Л.М. Пиотровский. – 7-е изд., стереотип.- Ленинград: Энергия, 1975.- 504 с.:илл.
3. Яковлев, Г.С.Судовые электрические машины: учебник/ Г.С.Яковлев, А.Н.Маникин.- 2-изд., перераб.- Ленинград: Судостроение, 1980.- 224 с.: илл.

Дополнительная литература

1. Элементарный учебник физики: учебное пособие для ВУЗов.- В 3-х тт.-Т.2 :Электричество и магнетизм/ Под ред. Г.С.Ландсберга.- Москва: Наука,1975.- 528 с.