

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

**Рубцовский индустриальный институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»**

**Г.В. Плеханов**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Учебное пособие для студентов СПО по специальности  
13.02.07 «Электроснабжение»**

Рубцовск 2024

УДК 621.313

Плеханов Г.В. Электрические машины. Часть 1. Введение в электромеханику. Трансформаторы. Машины постоянного тока: Учебное пособие для студентов СПО специальности 13.02.07 «Электроснабжение»/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – 59 с.

В учебном пособии рассмотрены законы электромеханики, физические и теоретические основы электромеханического преобразования энергии в трансформаторах и машинах постоянного тока, особенности их конструкции, методологические основы их исследования и принципы управления, параметры и характеристики преобразователей.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Электроэнергетика»  
Протокол № 5 от 30.05.24 г.

© Рубцовский индустриальный институт, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ	5
1.1. Введение	5
1.2. Законы электромеханики	7
1.2.1. Первый закон электромеханики	7
1.2.2. Второй закон электромеханики	10
1.2.3. Третий закон электромеханики	11
Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ	13
2.1. Классификация трансформаторов	13
2.2. Принцип действия трансформаторов	14
2.3. Режим холостого хода трансформатора	17
2.4. Работа трансформатора под нагрузкой	19
2.5. Режим нормального короткого замыкания трансформатора	21
2.6. Внешняя (нагрузочная) характеристика трансформатора	21
2.7. Коэффициент полезного действия трансформатора	22
2.8. Рабочие характеристики трансформатора	22
2.9. Трехфазный трансформатор	22
2.10. Несимметричная нагрузка трансформаторов	24
2.10.1. Применение метода симметричных составляющих	24
2.10.2. Схемы замещения трансформатора для токов прямой и обратной последовательности	25
2.10.3. Токи нулевой последовательности в трансформаторах	26
2.10.4. Схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности	27
2.11. Параллельная работа трансформаторов	30
2.12. Разновидности трансформаторов	32
2.12.1. Многообмоточные трансформаторы	32
2.12.2. Автотрансформаторы	32
2.12.3. Трансформаторы специального назначения	36
2.12.3.1. Сварочные и печные трансформаторы	36
2.12.3.2. Выпрямительные трансформаторы	37
2.12.3.3. Реакторы и реактивные катушки	38
Глава 3. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	39
3.1. Конструкция и принцип действия	39
3.2. ЭДС вращения и момент машины постоянного тока	41
3.3. Реакция якоря машины постоянного тока	42
3.4. Коммутация коллекторной машины постоянного тока	42

3.5. Потери мощности в электрических машинах постоянного тока	44
3.6. Генераторы постоянного напряжения	45
3.7. Энергетическая диаграмма генератора независимого возбуждения и его характеристики	47
3.8. Генератор параллельного возбуждения	49
3.9. Генератор последовательного возбуждения	51
3.10. Генератор со смешанным возбуждением	52
3.11. Двигатели постоянного тока	53
3.12. Энергетическая диаграмма двигателей постоянного тока	53
3.13. Механические характеристики двигателя с независимым возбуждением	54
3.14. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения	56
3.15. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения	57
3.16. Рабочие характеристики двигателей постоянного тока	58
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>59</b>

# Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКУ

## 1.1. Введение

Использование природных ресурсов немислимо без преобразования одних видов энергии в другие. Устройства для такого преобразования энергии, выполняющие механические движения, называются энергетическими машинами. Значительная часть энергии, запасенной в природе в виде химической энергии, ядерной энергии, энергии движения рек и морей, энергии ветра и энергии излучения солнца, преобразуется в современном мире в электрическую энергию. Целесообразность такого преобразования связана с тем, что электрическую энергию с малыми затратами можно передать на большие расстояния, распределить между потребителями и снова преобразовать в механическую, тепловую или химическую энергию.

Машины, совершающие преобразование механической энергии в электрическую или обратное преобразование, называются электрическими машинами.

Электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую, носит название «генератор». Электрическая машина, предназначенная для обратного преобразования, называется «двигателем». Электрические машины обратимы. Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах основано на явлении электромагнитной индукции.

Электрические машины, действие которых основано на законе электромагнитной индукции, называются индуктивными. Простейшим и наиболее распространенным индуктивным преобразователем, при помощи которого переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения, является трансформатор. Его обмотки и магнитопровод взаимно неподвижны, и процесс периодического изменения магнитного поля, в результате которого в обмотках индуктируются ЭДС, осуществляется в трансформаторе электрическим путем.

Индуктивные преобразователи электрической энергии, в которых имеются движущиеся части, называются электрическими машинами.

Наряду с индуктивными электрическими машинами существуют так называемые емкостные электрические машины, в которых электромеханическое преобразование энергии основано на явлении электростатической индукции и связано с периодическим изменением электрического поля в конденсаторе с взаимно перемещающимися электродами. Однако такие машины по своим массогабаритным и стоимостным показателям не могут конкурировать с индуктивными машинами и в промышленном электромеханическом преобразовании энергии не используются.

Электрическая машина как преобразователь энергии является важнейшим элементом любой энергетической или промышленной установки. Она находит широкое применение в качестве генератора, двигателя или преобразователя на электрических станциях, промышленных и сельскохозяйственных объектах, в

железнодорожном, автомобильном и электрифицированном городском транспорте, в авиации и космонавтике. Все более расширяется применение электрических машин в системах автоматического управления и регулирования. Электрические машины могут быть рассчитаны для работы с сетью переменного или постоянного тока. В соответствии с этим они разделяются на машины переменного тока и машины постоянного тока.

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

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

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

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

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

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

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

Электрические машины могут иметь возвратно-поступательное движение. Однако в машинах с возвратно-поступательным движением статор и ротор разомкнуты и магнитное поле отражается от краев, что приводит к искажению

поля в воздушном зазоре. Краевой эффект в линейных электрических машинах ухудшает энергетические показатели. Низкие энергетические показатели ограничивают применение электрических машин с возвратно-поступательным движением.

## 1.2. Законы электромеханики

Электромеханика является одним из разделов физики, в котором рассматривается электромеханическое преобразование энергии. В электромеханических преобразователях (ЭП) – электрических машинах – осуществляются технические применения электромеханического преобразования энергии.

Электромеханика является фундаментальной наукой, для которой могут быть сформулированы следующие законы.

### 1.2.1. Первый закон электромеханики

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

Окружающий нас мир состоит из преобразователей энергии, которые можно разделить на простые и сложные.

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

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

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

Электромеханические преобразователи энергии относятся к сложным преобразователям, так как электромеханическое преобразование энергии в них всегда сопровождается преобразованием электрической  $P_{эл}$  или механической энергии  $P_{мех}$  в тепловую  $P_T$  (рис. 1.1).

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

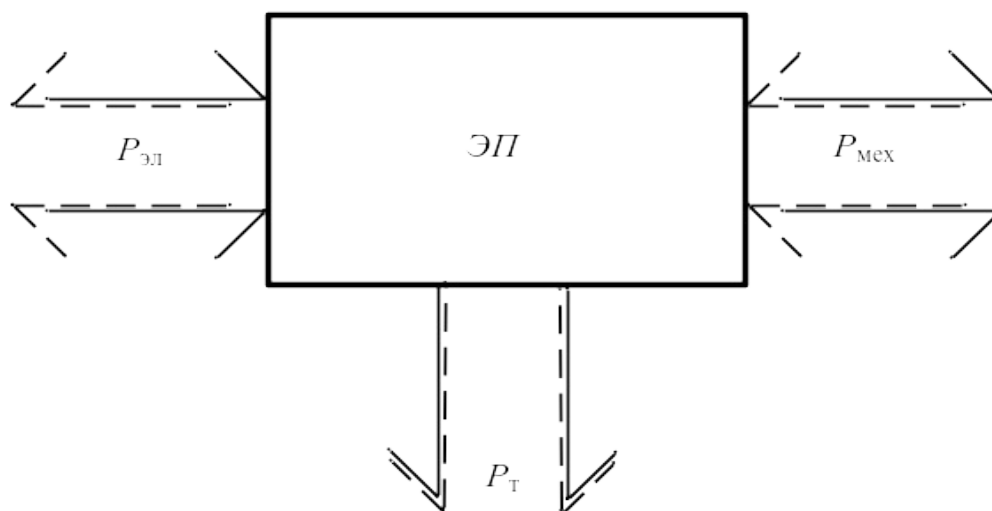


Рис. 1.1. Направление потоков энергии в электрической машины

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

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

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

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



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

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

Электромеханика – это наука о замкнутых контурах. Электромеханический преобразователь можно представлять как шестиполюсник (рис. 1.2, а) с двумя электрическими выводами, характеризуемыми напряжением  $U$  и частотой  $f$ , с двумя механическими выводами, определяемыми моментом  $M$  и механической частотой вращения  $n$ , а также тепловым контуром, характеризуемым количеством тепла  $Q$  и температурой  $t$ .

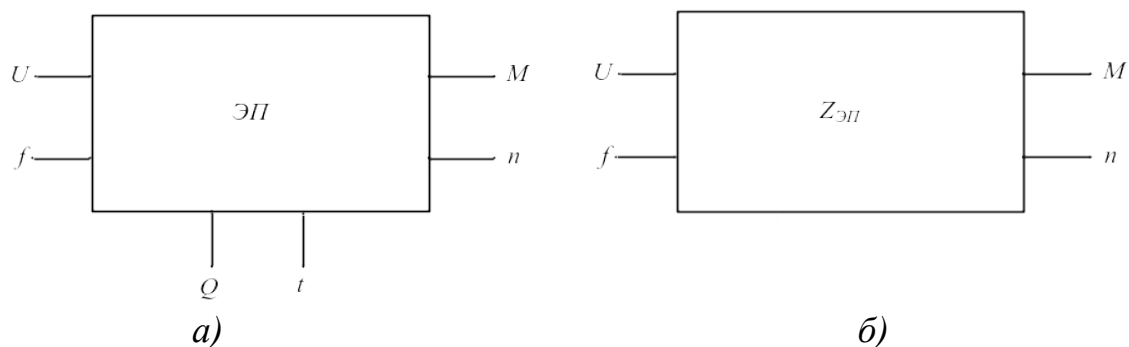


Рис. 1.2. Представление электрической машины в виде шестиполюсника (а) и четырехполюсника (б)

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

При исследовании электрических машин нельзя забывать об электрической сети, в которой могут изменяться внутреннее сопротивление, а также частота и напряжение. Машина может работать в ограниченном пространстве, и температура среды, окружающей машину, может изменяться. Изменение инерционных масс на валу машины и момента нагрузки также влияет на работу машины.

В большинстве исследований тепловой контур рассматривается как имеющий бесконечный объем с неизменной температурой. Поэтому элек-

троемеханический преобразователь можно представить как четырехполюсник с внутренним сопротивлением  $Z_{ЭП}$  (рис. 1.2, б), с двумя электрическими выводами напряжением  $U$  и электрической частотой  $f$ , а также двумя механическими выводами – моментом на валу  $M$  и частотой вращения  $n$ .

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

### 1.2.2. Второй закон электромеханики

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

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

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

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

В ЭП имеет место режим преобразования электрической или механической энергии в тепло. Это режим холостого хода. Синхронные машины, работающие параллельно с сетью в режиме холостого хода, называют синхронными компенсаторами.

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

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

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

### 1.2.3. Третий закон электромеханики

Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга.

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

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

где  $\omega_c$  – угловая скорость поля;  $P_{эм}$  – мощность магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре (электромагнитная мощность).

Поля, неподвижные относительно друг друга, создают  $M_{эм}$ , а поля, перемещающиеся в воздушном зазоре относительно друг друга, создают поток тепловой энергии, косвенно влияя на распределение потоков механической и электрической энергии. Увеличение потерь в машине приводит к снижению КПД.

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

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

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

В асинхронных машинах частота тока в роторе

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

где скольжение (относительная скорость)

$$s = (\omega_c \pm \omega_p) / \omega_c. \quad (1.3)$$

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

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

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

$$f_1 = p \cdot n, \quad (1.4)$$

где  $p$  – число пар полюсов.

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

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

## Глава 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство с двумя или несколькими обмотками, использующее явление электромагнитной индукции для преобразования токов и напряжений одной системы в токи и напряжения другой. При этом может изменяться число фаз, а в некоторых случаях и частота переменного тока. Трансформатор является одним из самых экономичных электрических аппаратов; он используется во всех областях техники и в быту. Особо важную роль трансформаторы играют при передаче электрической энергии на большие расстояния, так как в этом случае до поступления ее потребителю она подвергается многократному (3-5 раз) преобразованию с низкого напряжения в высокое напряжение и наоборот.

### 2.1. Классификация трансформаторов

Основными признаками классификации трансформаторов являются:

а) **Назначение.** Различают три основные группы трансформаторов: силовые, согласующие и импульсные. Первые предназначены для питания различной аппаратуры, они составляют основную долю существующих трансформаторов. Вторые подразделяются на входные, промежуточные и выходные; они могут работать на фиксированной частоте или в полосе частот. Третьи предназначены для передачи напряжения или тока различной формы из одной части электрической цепи в другую.

б) **Количество обмоток.** Существуют одно-, двух- и многообмоточные трансформаторы. Трансформаторы с одной обмоткой называют автотрансформаторами. Трансформаторы с двумя обмотками являются базой при анализе на моделях или при чисто теоретических исследованиях. Многообмоточные трансформаторы являются чаще всего силовыми трансформаторами.

в) **Рабочая частота.** Различают трансформаторы: пониженной частоты – ниже 50 Гц; промышленной частоты – 50 Гц; повышенной частоты – диапазон 100-10000 Гц. Мощные трансформаторы, как правило, питаются напряжением промышленной частоты. Повышение частоты работы силовых трансформаторов позволяет значительно улучшить их массогабаритные показатели.

г) **Число фаз.** В промышленности используются одно- и трёхфазные трансформаторы. Если число фаз не оговаривается, но это имеет существенное значение, то имеется в виду однофазный трансформатор.

д) **Напряжение.** Существуют низковольтные и высоковольтные трансформаторы.

е) **Мощность.** По диапазону мощностей различают: малой (несколько десятков вольт-ампер); средней (до нескольких сотен вольт-ампер) и большой (до  $10^9$  вольт-ампер) мощности трансформаторы.

ж) **Конструкция.** Различают броневой, стержневой и тороидальный трансформаторы.

з) **Охлаждение.** Существуют трансформаторы с воздушным и масляным охлаждением.

## 2.2. Принцип действия трансформаторов

Диапазон мощностей, в которых работают трансформаторы, огромен. Как уже было отмечено ранее, мощные силовые трансформаторы преобразуют мощности до  $10^9$  вольт-ампер, тогда как трансформаторы маломощные (например, в источниках вторичного питания) преобразуют мощность в несколько вольт-ампер. Диапазон напряжений, в которых работают трансформаторы, также огромен: от нескольких вольт до сотен киловольт. Такая разнородность условий работы трансформаторов обуславливает большое разнообразие их конструкций, однако физическая суть их работы остается всегда одной и той же. На рис. 2.1 показана электромагнитная схема обобщенного трансформатора, которая является основой для анализа любых конструкций. На ферромагнитном сердечнике размещены две обмотки: первичная с количеством витков  $\omega_1$  и вторичная с количеством витков  $\omega_2$ . Первичная обмотка подключается к источнику с напряжением  $U_1$ , ко вторичной обмотке присоединяется нагрузка. Токи, протекающие по обмоткам, создают помимо основного магнитного потока  $\Phi_c$  поток рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{\sigma 1}$  и поток рассеяния вторичной обмотки  $\Phi_{\sigma 2}$ .

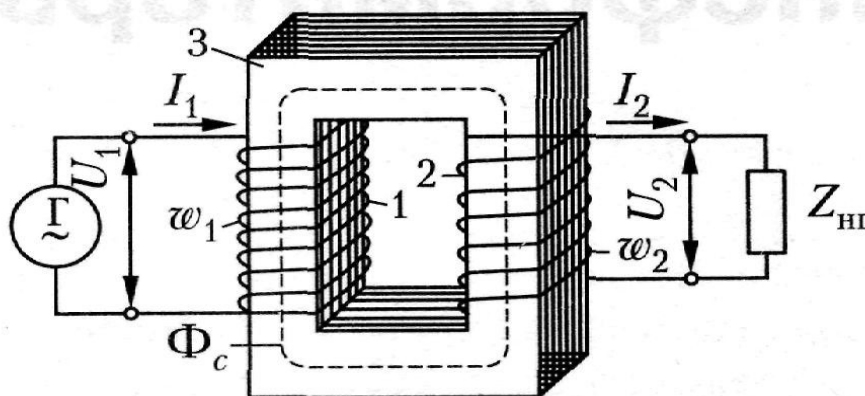


Рис. 2.1. Электромагнитная схема обобщенного трансформатора:  
1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка;  
3 – замкнутый ферромагнитный сердечник;  $\Gamma$  – генератор;  
 $Z_{нг}$  – сопротивление нагрузки

Рассмотрим электромагнитные процессы, возникающие в простейшем трансформаторе (рис. 2.1) при подключении первичной обмотки к сети переменного тока.

Физико-логическая схема этих процессов представлена на рис. 2.2.

Поясним эту схему, предварительно указав, что все величины, относящиеся к первичной обмотке, здесь отмечены подстрочным индексом «1», а относящиеся ко вторичной – индексом «2».

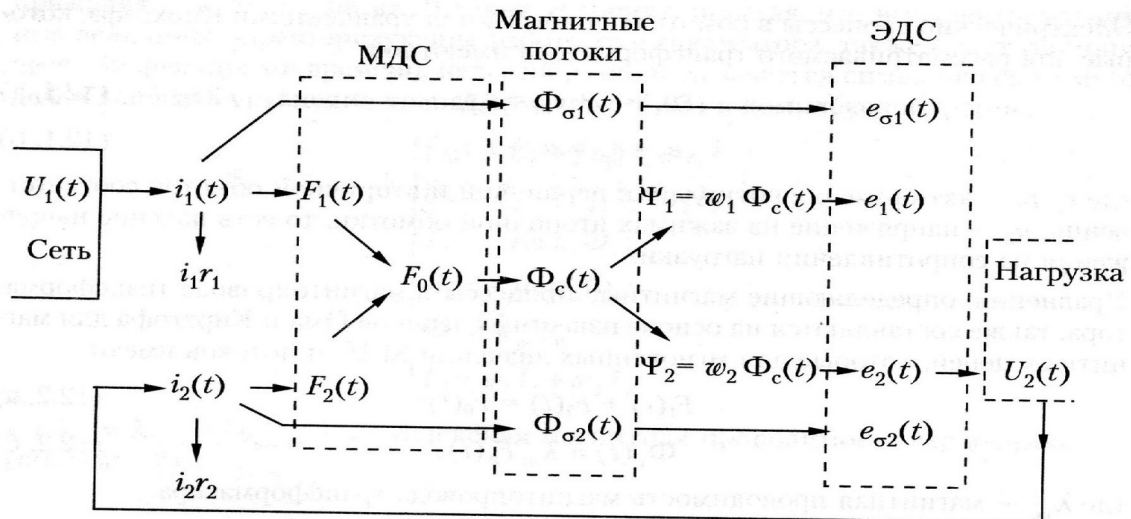


Рис. 2.2. Физико-логическая схема электромагнитных процессов в трансформаторе

Из схемы видно, что возникающий под действием  $U_1(t)$  ток  $i_1(t)$  создает магнитодвижущую силу (МДС)  $F_1(t) = \omega_1 i_1(t)$ , которая возбуждает в сердечнике магнитный поток взаимоиндукции  $\Phi_c$ , магнитно связывающий первичную и вторичную обмотки трансформатора. Этот периодически изменяющийся поток индуцирует в обеих обмотках трансформатора электродвижущую силу (ЭДС)  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$ . В результате на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение  $U_2(t)$ , а если вторичная обмотка замкнута на сопротивление нагрузки, то и ток  $i_2(t)$ . Протекая по вторичной обмотке, этот ток создает МДС  $F_2(t) = \omega_2 i_2(t)$ . Следовательно, при включенной нагрузке ( $i_2(t) \neq 0$ ) поток в сердечнике  $\Phi_c(t)$  будет возбуждаться под действием двух МДС  $F_1(t)$  и  $F_2(t)$ . Результирующую этих МДС  $F_0(t) = F_1(t) + F_2(t)$  следует рассматривать как источник возбуждаемого в сердечнике магнитного потока  $\Phi_c(t)$ . Обратим внимание на то, что в изложенной концепции магнитной цепи, принятой в теории трансформаторов, предполагается, что поток взаимоиндукции  $\Phi_c$  сцепляется со всеми витками первичной и вторичной обмотки. Магнитные потоки  $\Phi_{\sigma 1}(t)$  и  $\Phi_{\sigma 2}(t)$  принято называть потоками рассеяния, так как они не участвуют в передаче электромагнитной энергии из одной обмотки в другую. Они индуцируют ЭДС в своих обмотках, которые называются ЭДС рассеяния. Все выделенные МДС, магнитные потоки и индуцируемые ими ЭДС обведены на схеме пунктирной линией. Таким образом, математическая модель описания электромагнитных процессов в трансформаторе должна включать в себя соответствующие уравнения для электрических цепей (обмоток) и магнитной цепи (сердечника).

Электрические процессы в обмотках описываются уравнениями Кирхгофа, которые для рассматриваемого трансформатора имеют вид

$$U_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = r_1 i_1, \quad (2.1,a)$$

$$e_2 + e_{\sigma 2} = U_2 + r_2 i_2, \quad (2.1,b)$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток соответственно;  $U_2$  – напряжение на зажимах вторичной обмотки, то есть падение напряжения на сопротивлении нагрузки.

Уравнения, определяющие магнитные процессы в магнитопроводе трансформатора, также составляются на основе известных законов Ома и Кирхгофа для магнитных цепей, которые для мгновенных значений МДС и потоков имеют

$$F_1(t) + F_2(t) = F_0(t); \quad (2.2, a)$$

$$\Phi_c(t) = \lambda_{\mu c} F_0(t), \quad (2.2, б)$$

где  $\lambda_{\mu c}$  – магнитная проводимость магнитопровода трансформатора. Выражения для ЭДС рассеяния –  $e_{\sigma 1}$  и  $e_{\sigma 2}$  – можно представить в виде

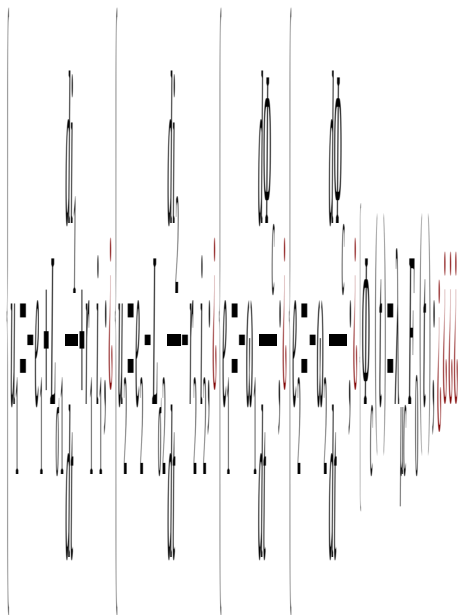
$$e_{\sigma 1} = - L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad e_{\sigma 2} = - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt},$$

где  $L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$  – самоиндуктивности рассеяния первой и второй обмоток соответственно.

ЭДС  $e_1(t)$  и  $e_2(t)$  в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.2, определяются выражениями

$$e_1 = - \omega_1 \frac{d\Phi_c}{dt}; \quad e_2 = - \omega_2 \frac{d\Phi_c}{dt},$$

Согласно схеме, приведенной на рис. 2.2, математическую модель двух-обмоточного трансформатора можно представить системой уравнений для мгновенных значений напряжения и тока в дифференциальном виде:



(2.3)

Представленная модель может быть использована для анализа как установившихся, так и переходных режимов работы.



### 2.3. Режим холостого хода трансформатора

Для выяснения сущности физических процессов в трансформаторе рассмотрим вначале его работу в режиме холостого хода, когда ток во вторичной цепи равен нулю (нагрузка не подключена). При подаче на первичную обмотку трансформатора (рис. 2.1) синусоидального питающего напряжения по ней протекает ток. Под действием связывающего обе обмотки магнитного потока в обеих обмотках наводятся ЭДС самоиндукции. При синусоидальном напряжении  $U_1$  форму кривой магнитного потока в ферромагнитном сердечнике также можно считать синусоидальной. Форма же кривой тока в режиме холостого хода, вследствие насыщения магнитной системы, становится заостренной и имеет резко выраженную третью гармонику, амплитуда которой достигает 15-30% от амплитуды первой гармоники. С целью использования при расчетах трансформаторов символического метода действительную форму тока заменяют эквивалентной синусоидальной. Действующее значение эквивалентной синусоиды равно действующему значению реального тока, а фазовый сдвиг этой эквивалентной синусоиды относительно приложенного напряжения зависит от потерь в ферромагнитном сердечнике.

Следует при этом отметить, что режим холостого хода позволяет определить такие важные для практики параметры трансформатора, как коэффициент трансформации, потери в ферромагнитном сердечнике, индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Магнитный поток рассеяния (рис. 2.1) находится в фазе с первичным током трансформатора, а основной магнитный поток вследствие потерь в сердечнике незначительно отстает по фазе от тока. Поэтому на основании второго закона Кирхгофа для режима холостого хода можно записать:

$$U_1 = E_1 + R_1 I_{10} + jx_{p1} I_{10}. \quad (2.4)$$

Здесь  $U_1$ ,  $E_1$ ,  $I_{10}$  – комплексы питающего напряжения, ЭДС и эквивалентного тока первичной обмотки, а  $R_1$ ,  $x_{p1}$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния. В режиме холостого хода падения напряжения на активном и индуктивном сопротивлении малы по сравнению с ЭДС, поэтому уравнение (2.4) принимает вид

$$U_1 = E_1. \quad (2.5)$$

Разложив вектор тока  $I_{10}$  на две составляющие:  $I_\mu$  – вектор тока намагничивания трансформатора, обеспечивающий протекание в ферромагнитном сердечнике потока  $\Phi_m$ , и вектор  $I_a$  – вектор тока, учитывающий активные потери на гистерезис и вихревые токи в сердечнике трансформатора, можем получить схему замещения холостого хода трансформатора (рис. 2.3, а). В этой схеме замещения трансформатор представляется только как идеальный преобразователь ЭДС, коэффициент преобразования рассчитывается следующим образом.

Учитывая связь ЭДС самоиндукции  $e(t)$  с магнитным потоком  $\Phi(t)$ , легко получить уравнение трансформаторных ЭДС на первичной и вторичной обмот-

ках. Действующие значение этих ЭДС равно:

$$E_1 = \sqrt{2} \pi \omega_1 \cdot f \cdot \Phi_m = 4,44 \omega_1 \cdot f \cdot \Phi_m = 4,44 \omega_1 \cdot f \cdot B_m S, \quad (2.6)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – числа витков обмоток,  $B_m$  – магнитная индукция,  $S$  – сечение сердечника трансформатора и  $f$  – частота питающей сети.

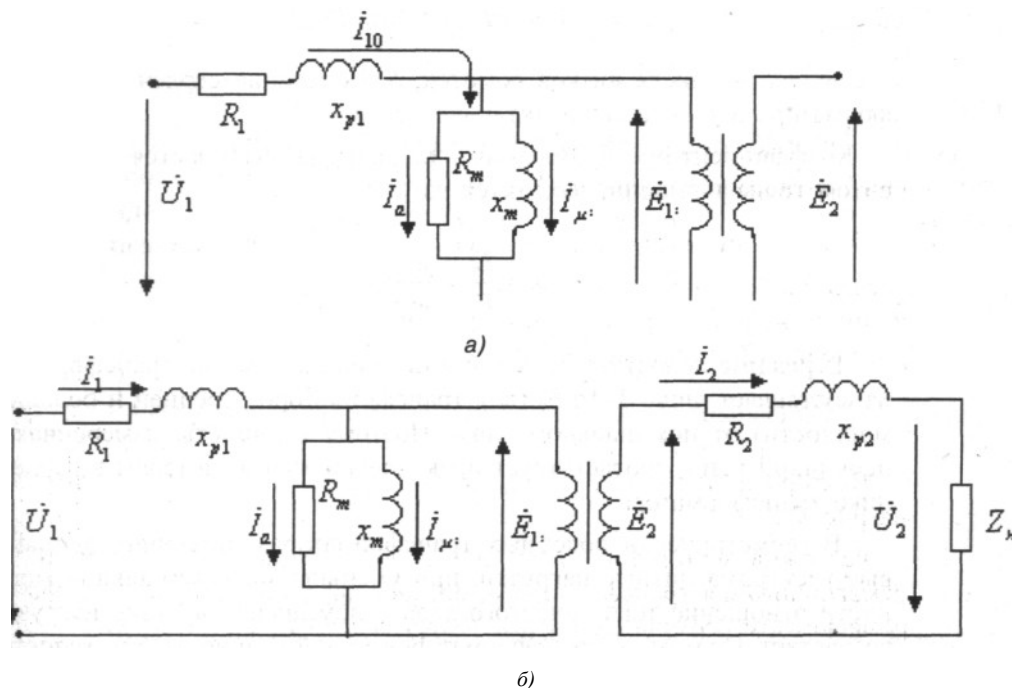


Рис. 2.3. Схемы замещения трансформатора для режима холостого хода (а), нагрузки (б)

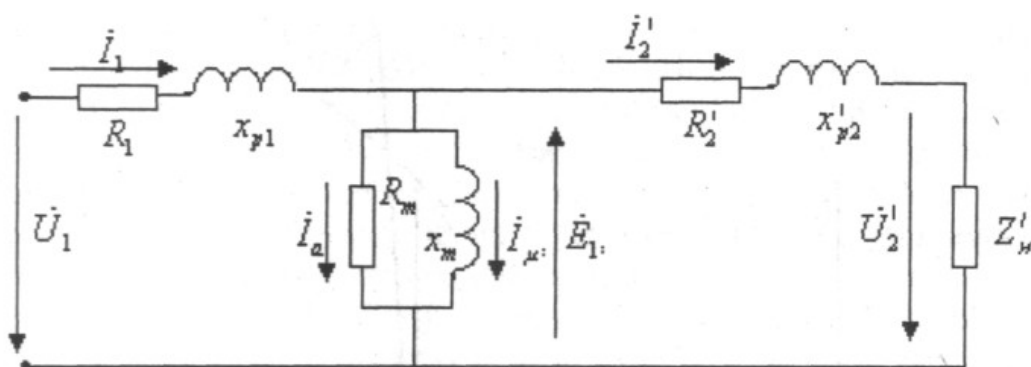


Рис. 2.4. Схема замещения приведенного трансформатора

Коэффициент преобразования ЭДС, который называется коэффициентом трансформации, находится из (2.6):

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} . \quad (2.7)$$

В режиме холостого хода ток в первичной обмотке трансформатора составляет лишь 3-10% (для трансформаторов средней и большой мощности) от номинального тока. Поэтому мощность, измеренная в первичной цепи, соответствует практически только потерям в сердечнике трансформатора.

В геометрически подобных трансформаторах, имеющих одинаковые электромагнитные нагрузки, при уменьшении номинальной мощности отношение тока холостого хода к номинальному току нагрузки возрастает. Поэтому у трансформаторов малой мощности ток холостого хода может достигать 10-60% от номинального тока. В этом случае мощность в режиме холостого хода будет отражать не только потери в ферромагнитном сердечнике, но и потери в активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора. Параметры режима холостого хода: номинальное напряжение, ток и мощность заносятся в справочные данные на трансформатор на заводе-изготовителе. По этим данным рассчитываются параметры схемы замещения (рис. 2.3, а), необходимые для анализа трансформатора.

$$R_0 = \frac{U_1}{I_{10} \cos \phi_0}, \quad x_0 = \frac{U_1}{I_{10} \sin \phi_0}, \quad \phi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 I_{10}} . \quad (2.8)$$

## 2.4. Работа трансформатора под нагрузкой

При подключении нагрузки  $Z_H$  к вторичной обмотке трансформатора ЭДС  $E_2$  создает ток  $I_2$  во вторичной цепи. Так как трансформатор начинает отдавать нагрузке некоторую мощность, то возрастает и мощность, потребляемая из сети, т.е. к току  $I_{10}$  добавляется некоторый дополнительный ток  $I_k$ , называемый компенсационным. При этом ток в первичной обмотке становится равным

$$I_1 = I_{10} + I_k \quad (2.9)$$

Величину компенсационного тока можно найти из следующих соображений. Электромагнитная мощность полностью передается идеальным трансформатором из первичной во вторичную цепь, поэтому

$$E_1 I_k = E_2 I_2 = \frac{E_1}{n} I_2 . \quad (2.10)$$

Из уравнения (2.10) находится значение компенсационного тока

$$I_k = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{n} . \quad (2.11)$$

Схема замещения трансформатора для режима нагрузки (рис. 2.3, б) будет отличаться от схемы замещения, соответствующей холостому ходу, лишь добавлением параметров вторичной обмотки и сопротивления нагрузки транс-

форматора. В этом случае для математического описания трансформатора к уравнениям (2.4, 2.9) нужно добавить уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа для вторичной цепи, тогда полная система уравнений, описывающая трансформатор, примет вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = E_1 + R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_{p1} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_{p2} \dot{I}_2 + \dot{U}'_2 \end{cases} \quad (2.12)$$

Исследование трансформатора (аналитическое и экспериментальное) значительно облегчается, если реальный трансформатор с магнитно-связанными обмотками заменить эквивалентной схемой, элементы которой электрически связаны между собой. Для этого необходимо реальный трансформатор заменить эквивалентным (т.н. приведенным) трансформатором, у которого число витков первичной и вторичной обмоток равны. При таком приведении должны оставаться неизменными все энергетические соотношения в трансформаторе.

Нетрудно преобразовать два последних уравнения системы (2.12) с учетом (2.7) к виду:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = E_1 + R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_{p1} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_{p2} \dot{I}_2 + \dot{U}'_2 \end{cases} \quad (2.13)$$

Параметры приведенного и неприведенного трансформаторов связаны соотношениями:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_2^i; \quad \dot{I}_2^i = \frac{\dot{I}_2}{n}; \quad R_2^i = n^2 R_2; \quad x_{p2}^i = n^2 x_{p2}; \quad Z_n^i = n^2 Z_n \quad (2.14)$$

Схема замещения приведенного трансформатора изображена на рис. 2.4. Число витков обеих его обмоток одинаково, что позволяет совместить их в одну. По этой обмотке протекает намагничивающий ток, обеспечивающий образование магнитного потока, который замыкается по сердечнику трансформатора. Активная мощность, выделяемая в контуре намагничивания, определяется потерями в сердечнике трансформатора.

Параметры приведенной схемы замещения сравнительно легко определяются из режимов холостого хода и короткого замыкания, и по ним можно

определить основные характеристики трансформатора. Однако режим холостого хода трансформатора не позволяет определить все параметры приведенной схемы замещения трансформатора. Поэтому завод-изготовитель на готовом трансформаторе проводит опыт «нормального» короткого замыкания.

## 2.5. Режим нормального короткого замыкания трансформатора

Вторичная обмотка при этом замыкается накоротко, а на первичную обмотку подаётся напряжение  $U$  такой величины, при которой ток первичной обмотки имеет номинальное значение. Величина  $U_k$  даже для трансформаторов малой мощности не превышает 10-25% от номинального значения. Учитывая пропорциональную зависимость магнитного потока от напряжения, приложенного к первичной обмотке, и зависимость потерь в сердечнике трансформатора от квадрата магнитного потока, можно прийти к выводу, что в режиме «нормального» короткого замыкания потерями в сердечнике трансформатора можно пренебречь и считать показания ваттметра, включенного на входе трансформатора, соответствующими мощности потерь в активных сопротивлениях трансформатора. Это позволяет определить параметры схемы замещения приведенного трансформатора по формулам:

$$R_k = \frac{U_k \cos \phi_k}{I_H}, \quad x_k = \frac{U_k \sin \phi_k}{I_H}, \quad \phi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k I_H}. \quad (2.15)$$

Таким образом, с учетом  $X_0$  и  $R_0$ , которые определяются в режиме холостого хода, мы имеем все параметры приведенной схемы замещения трансформатора.

## 2.6. Внешняя (нагрузочная) характеристика трансформатора

Из приведенной схемы замещения трансформатора (рис. 2.4) следует, что

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_H + \Delta \dot{U}_{\text{тр}}; \quad (2.16)$$

отсюда находим выражение для вектора падения напряжения на трансформаторе:

$$\Delta \dot{U}_{\text{тр}} = \dot{U}_1 - \dot{U}_H = \dot{U}_1 - Z_H \dot{I}_2. \quad (2.17)$$

Модуль вектора падения напряжения на трансформаторе можно также получить, воспользовавшись выражением:

$$\Delta U \% = \beta (U_{\text{ка}} \cos \phi + U_{\text{кр}} \sin \phi) + \frac{\beta^2 (U_{\text{ка}} \cos \phi - U_{\text{кр}} \sin \phi)^2}{200}, \quad (2.18)$$

$$U_{\text{ка}} = \frac{I_{1.\text{ном}} R_k}{U_{1.\text{ном}}}; \quad U_{\text{кр}} = \frac{I_{1.\text{ном}} x_k}{U_{1.\text{ном}}};$$

где  $I_{1.\text{ном}}$ ;  $U_{1.\text{ном}}$  — номинальные ток и напряжение первичной обмотки;

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1 \text{ ном}}}; \quad (2.19)$$

здесь  $\beta$  – коэффициент нагрузки.

Вид внешней характеристики трансформатора определяется не только величиной нагрузки, но и ее характером. При увеличении тока нагрузки выходное напряжение трансформатора уменьшается при активном и активно-индуктивном характерах нагрузки и увеличивается при емкостном и активно-емкостном характерах нагрузки.

## 2.7. Коэффициент полезного действия трансформатора

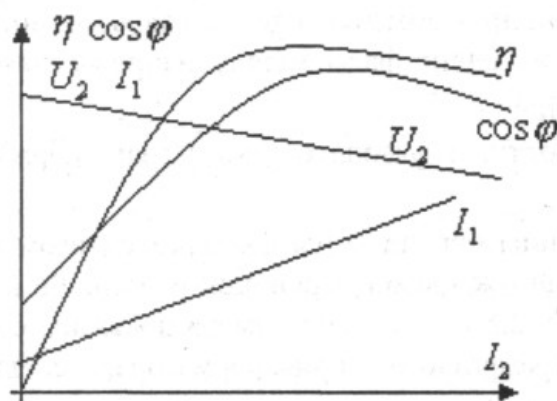
Определение коэффициента полезного действия  $\eta$  (эта) трансформатора как отношение мощности выделяемой в нагрузке ( $P_n$ ) к полной мощности ( $P_l$ ), потребляемой из электрической сети, может привести к значительным ошибкам, так как разность ( $P_n - P_l$ ) составляет, при КПД = 98%, всего лишь 2%, что соизмеримо с погрешностью измерительных приборов. Поэтому, согласно ГОСТ, величину КПД определяют косвенным способом:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{xx} + P_k}, \quad (2.20)$$

где  $P_{xx}$ ,  $P_k$  – потери холостого хода и короткого замыкания.

## 2.8. Рабочие характеристики трансформатора

Рабочие характеристики трансформатора представляют собой зависимости коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, тока в первичной цепи и напряжения на нагрузке от тока в нагрузке. Все эти зависимости рассчитываются на основании приведенной схемы замещения (рис. 2.4). Характерный вид рабочих характеристик показан на рис. 2.5.



## 2.9. Трехфазный трансформатор

Энергетические соотношения, полученные для однофазных трансформаторов, справедливы и для трехфазных трансформаторов, но при обязательном условии их работы в режиме симметричной нагрузки. Причем в качестве трехфазного можно использовать и систему из трех одинаковых однофазных трансформаторов. Энергетические характеристики второго варианта трехфазного трансформатора ниже, чем у первого, но он обладает более высокой эксплуатационной надежностью, т.к. при аварии, как правило, выходит из строя лишь один из трех трансформаторов, и устранение этой аварии обходится значительно дешевле. Поэтому, согласно ГОСТ, при мощностях, больших 1600 кВА, допускается установка трех одинаковых трансформаторов.

В отличие от режима холостого хода режим короткого замыкания не имеет существенных особенностей по сравнению с режимом короткого замыкания однофазного трансформатора. Это объясняется отсутствием насыщения в этом режиме ферромагнитного сердечника, в соответствии с чем токи и мощности распределяются между фазами равномерно и формы кривых ЭДС синусоидальны. Поэтому все выводы, полученные для однофазного трансформатора, остаются в силе для трансформатора трехфазного.

Специфичными для трехфазных трансформаторов являются способы соединения его первичных и вторичных обмоток. Обмотки могут соединяться звездой (Y) или треугольником ( $\Delta$ ), при прямом и встречном включении. Полное число вариантов соединений обмоток высокой и низкой сторон трансформатора равно двенадцати (от нулевого до одиннадцатого варианта).

При соединении звездой может использоваться нулевой провод. Способ соединения обмоток влияет как на отношение напряжений на фазах, так и на сдвиг фазы между напряжениями на входе и выходе трансформатора.

В зависимости от фазового сдвига трансформаторы различаются по группам.

Номер группы определяется фазовым сдвигом между одноименными линейными напряжениями первичной и вторичной сторон, разделенным на  $30^\circ$ . На рис. 2.6 в качестве примера показаны соединение и векторная диаграмма трехфазного трансформатора, соединенного по схеме 11-й группы.

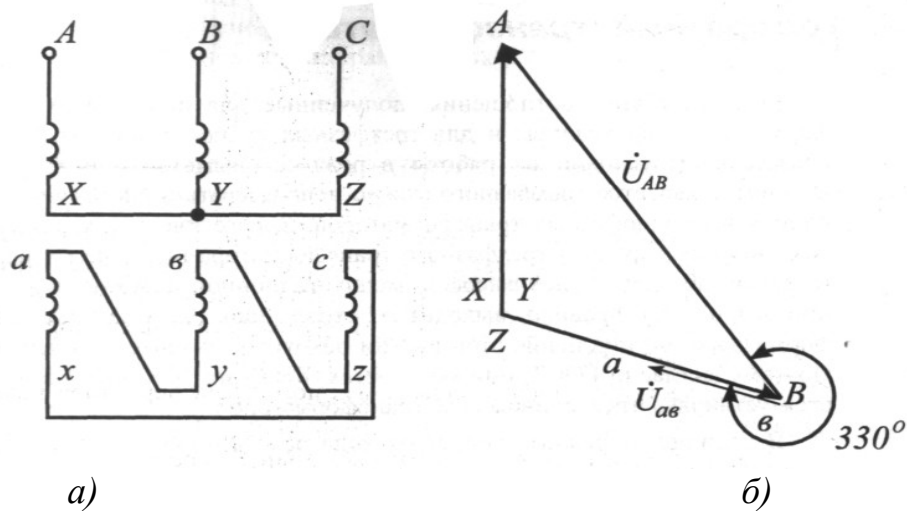


Рис. 2.6. Соединение (а) и векторная диаграмма (б) трехфазного трансформатора по схеме 11-й группы

## 2.10. Несимметричная нагрузка трансформаторов

### 2.10.1. Применение метода симметричных составляющих

На практике встречаются случаи, когда отдельные фазы трансформатора нагружены несимметрично (неравномерное распределение осветительной нагрузки по фазам, подключение мощных однофазных приемников и т.д.). Кроме того, в электрических сетях, питающихся от трансформаторов, случаются несимметричные короткие замыкания (однофазные на землю или на нулевой провод и двухфазные). При анализе несимметричных режимов работы трансформатора будем предполагать, что сам трансформатор имеет симметричное устройство, то есть все три фазы одинаковы в магнитном и электрическом отношениях.

Общим методом анализа несимметричных режимов является метод симметричных составляющих.



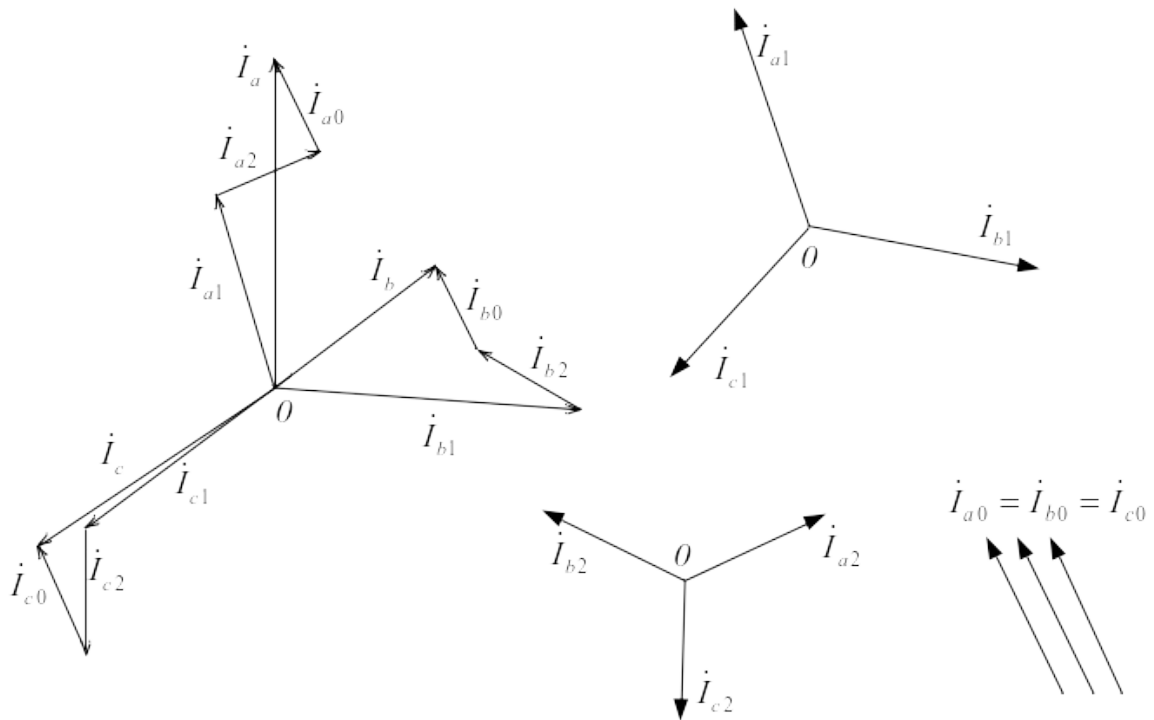


Рис. 2.7. Симметричные составляющие трехфазных токов

Согласно этому методу, трехфазная несимметричная система токов  $I_a, I_b, I_c$  разлагается на три системы токов прямой ( $I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}$ ), обратной ( $I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}$ ) и нулевой ( $I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}$ ) последовательности (рис. 2.7), связанные соотношениями

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{b0} \\ I_{b1} \\ I_{b2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{c0} \\ I_{c1} \\ I_{c2} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

где

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{b0} \\ I_{b1} \\ I_{b2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{c0} \\ I_{c1} \\ I_{c2} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

и  $a = e^{j(2\pi/3)}$ ;  $a^2 = e^{j(4\pi/3)}$ ;  $1 + a + a^2 = 0$ .

Симметричные составляющие фазы  $a$ , которые обычно принимаются за основные, определяются выражениями

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \end{aligned} \tag{2.23}$$

Заметим, что аналогичные соотношения действительны также для несимметричной системы напряжений фаз  $U_a, U_b, U_c$  и их симметричных составляющих.

Применение метода симметричных составляющих основано на принципе наложения. Тем самым предполагается, что для всех участков магнитной цепи трансформатора  $\mu = \text{const}$ , чем и обусловлена возможность его применения.

В целях упрощения записей далее будем предполагать, что число витков в первичной и вторичной обмотках равно ( $\omega_1 = \omega_2$ ) и поэтому нет надобности различать приведенные и неприведенные вторичные величины и обозначать последние штрихами. Общность получаемых при этом результатов не нарушается, так как всегда можно выполнить соответствующие пересчеты. Первичные фазные величины будем обозначать индексами  $A, B, C$ , а вторичные – индексами  $a, b, c$ .

### 2.10.2. Схемы замещения трансформатора для токов прямой и обратной последовательности

Ранее рассматривалась работа трансформатора при симметричной нагрузке, когда токи фаз трансформатора составляли симметричную систему прямой последовательности:  $I_b = a^2 I_a$ ;  $I_c = a I_a$ .

Если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, поменять местами два зажима со стороны высшего напряжения (например,  $B$  и  $C$ ) и со стороны низшего напряжения (например,  $b$  и  $c$ ), то режим работы потребителей и самого трансформатора не изменится. Однако чередование векторов токов фаз трансформатора при этом изменится на обратное, то есть будет соответствовать токам обратной последовательности. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из одной обмотки в другую так же, как и токи прямой последовательности.

Поэтому схемы замещения (рис. 2.3 и 2.4) действительны для токов как прямой, так и обратной последовательности. Сопротивление трансформатора по отношению к токам этих последовательностей также одинаково и равно. Можно отметить, что любое симметричное статическое (не имеющее вращающихся частей) трехфазное устройство (трансформатор, линия передачи, электрическая печь и т.д.) имеет равные сопротивления токам прямой и обратной последовательности.

### 2.10.3. Токи нулевой последовательности в трансформаторах

В обмотках, соединенных «звездой», токи нулевой последовательности могут возникать только при наличии нулевого провода (рис. 2.8, а), так как  $I_{a0}$ ,  $I_{b0}$ ,  $I_{c0}$  равны по значению и по фазе и в каждый момент времени во всех фазах направлены одинаково, поэтому цепь этих токов может замыкаться только через нулевой провод. В нулевом проводе протекает ток

$$I_a + I_b + I_c = 3I_{a0}. \quad (2.24)$$

Роль нулевого провода может играть также «земля», если нулевая точка трансформатора заземлена.

В обмотках, соединенных «треугольником» (рис. 2.8, б), токи  $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$  составляют ток, циркулирующий по замкнутому контуру. Линейные токи, которые представляют собой разности токов смежных фаз, в данном случае не содержат токов нулевой последовательности. Это означает, что токи нулевой последовательности возникают в фазных обмотках, соединенных «треугольником», только вследствие электромагнитной индукции с другими обмотками трансформатора.

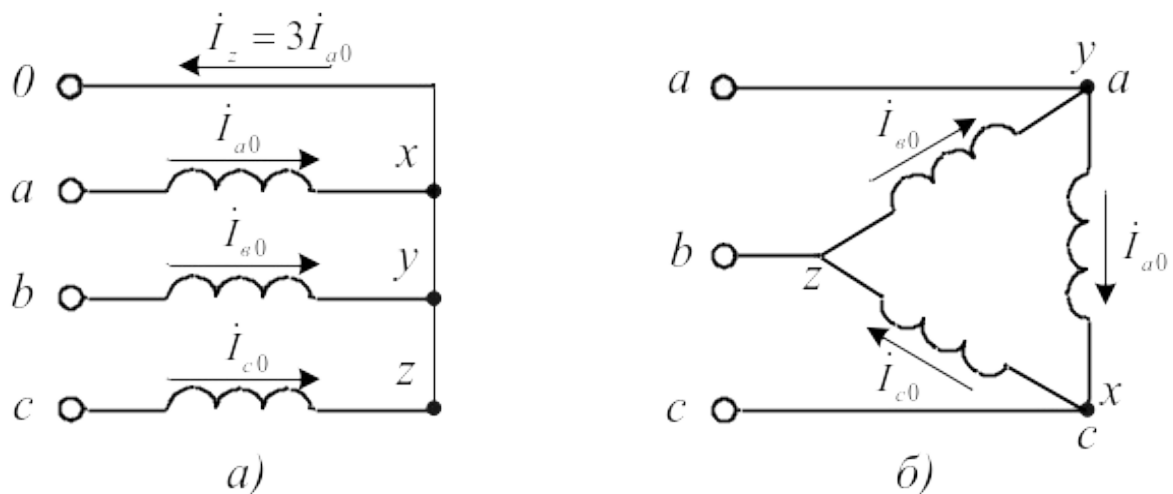


Рис. 2.8. Токи нулевой последовательности в обмотках, соединенных: а) в «звезду» с нулевым проводом, б) в «треугольник»

Токи нулевой последовательности создают во всех фазах потоки нулевой последовательности  $\Phi_{0п}$ , которые во времени совпадают по фазе. В этом отношении они аналогичны третьим гармоникам потока трехфазных трансформаторов, возникающим вследствие насыщения магнитной цепи.

#### 2.10.4. Схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности

Потоки, создаваемые токами нулевой последовательности, индуцируют в первичной и вторичной обмотках ЭДС само- и взаимоиндукции, как и потоки прямой последовательности. Если привести обмотки к одинаковому числу витков, то для токов нулевой последовательности можно составить Т-образную схему замещения (рис. 2.9), как и для токов прямой последовательности. Параметры отдельных элементов схемы замещения при этом зависят от

устройства магнитной цепи и обмоток трансформатора, но не зависят от схемы соединения обмоток. От нее зависит лишь вид схем замещения относительно выходных зажимов.

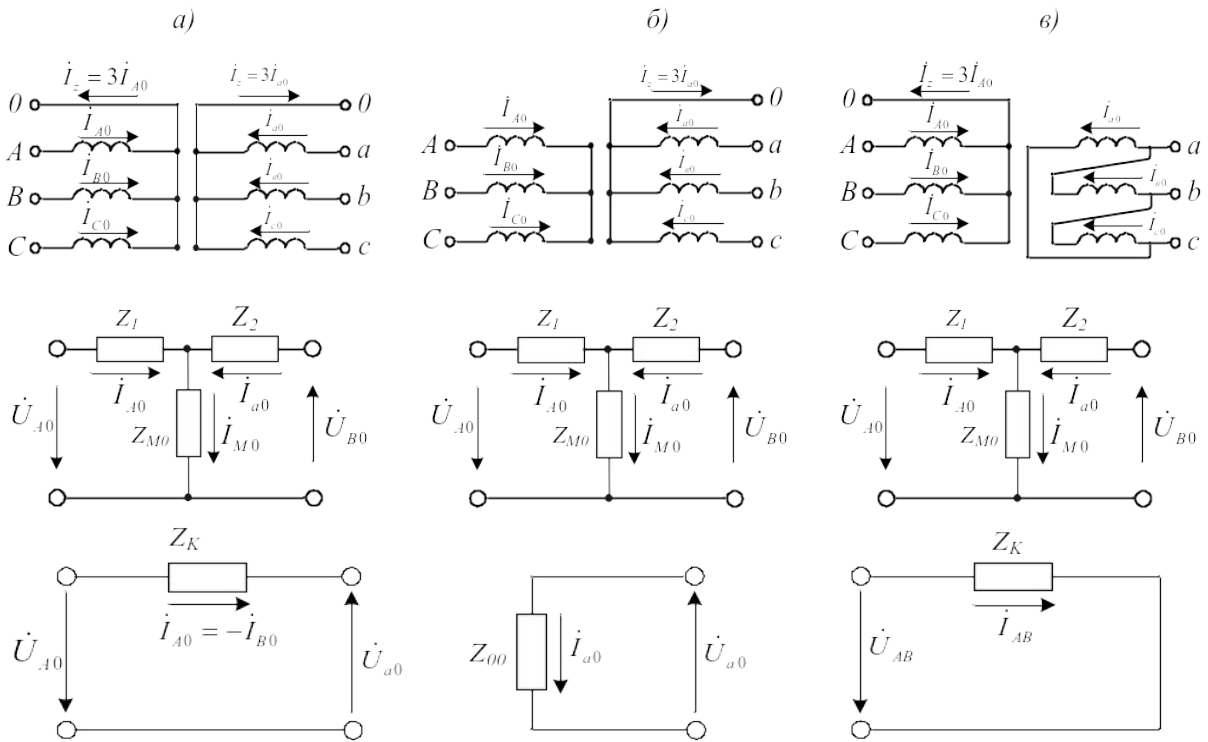


Рис. 2.9. Схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности с соединением обмоток:  
 а)  $Y_0/Y_0$ , б)  $Y/Y_0$ , в)  $Y_0/\Delta$

В трансформаторе с соединением обмоток  $Y_0/Y_0$  токи нулевой последовательности могут существовать как в самих первичной и вторичной обмотках, так и во внешних первичной и вторичной цепях трансформатора. Поэтому в этом случае схемы замещения для токов нулевой последовательности (рис. 2.9, а) по своему виду ничем не отличаются от схем замещения для токов прямой последовательности.

В трансформаторе с соединением обмоток  $Y/Y_0$  токи нулевой последовательности в обмотке без нулевого провода существовать не могут, и поэтому схема замещения нулевой последовательности со стороны этой обмотки разомкнута (рис. 2.9, б). Однако на зажимах обмотки без нулевого провода существует фазное напряжение нулевой последовательности  $U_{A0}$ , индуцируемое потоком нулевой последовательности обмотки  $\Phi_{0п}$ .

У трансформатора с соединением обмоток  $Y_0/\Delta$  токи нулевой последовательности также могут существовать в обеих обмотках, но обмотка, соединенная треугольником, замкнута относительно этих токов накоротко, и токи нулевой последовательности в ее внешней цепи существовать не могут. Поэтому в данном случае зажимы схемы замещения нулевой последовательности (рис. 2.9, в) со стороны обмотки треугольника замкнуты накоротко.

Сопротивления  $Z_1 = r_1 + jx_1$ ;  $Z_2 = r_2 + jx_2$  для схем замещения (рис.

2.9) содержат активные сопротивления  $r_1, r_2$  и индуктивные сопротивления рассеяния  $x_1, x_2$ , которые практически не отличаются от значений этих сопротивлений для токов прямой и обратной последовательности.

Сопротивления намагничивающей цепи  $Z_{m0}$  для броневых, бронестержневых и групповых трансформаторов также практически не отличаются от сопротивления намагничивающей цепи  $Z_k$  для токов прямой последовательности, так как в этих случаях потоки нулевой последовательности также замыкаются по замкнутым стальным сердечникам. Если токи нулевой последовательности протекают в обеих обмотках, то в этом случае намагничивающий ток составляет небольшую долю полного тока нулевой последовательности. Поэтому им можно пренебречь, и тогда получим упрощенные схемы замещения, изображенные в нижней части рис. 2.9, *a* и *в*. При этом  $Z_k = Z_1 + Z_2$ .

У трехстержневого трансформатора  $Z_{m0}$  в десятки и сотни раз меньше  $Z_k$  так как поток нулевой последовательности замыкается по воздуху. В этом случае обычно  $Z_{m0} = (7-15) Z_k$ , и без большой погрешности также можно пользоваться упрощенными схемами замещения (рис. 2.9, *a* и *в*).

ЭДС  $E_{a0}$  индуцируемая основным потоком нулевой последовательности, равна с обратным знаком напряжению на зажимах намагничивающей цепи схемы замещения:

$$E_{a0} = - Z_{m0} I_{o0}. \quad (2.25)$$

Входное сопротивление нулевой последовательности  $Z_{0п}$  трехфазного трансформатора в целом представляет собой сопротивление трансформатора токам нулевой последовательности, измеренное со стороны одной обмотки, когда все выводные зажимы второй обмотки замкнуты накоротко. Для схемы, приведенной на рис. 2.9, *a*, это сопротивление зависит от устройства магнитопровода.

Для броневых и бронестержневых и групповых трансформаторов  $Z_{m0} \gg Z_1 = Z_2$ , и поэтому

$$Z_{0п} = Z_1 + Z_2 = Z_k. \quad (2.26)$$

Однако и для стержневых трансформаторов соотношение (2.26) справедливо с достаточной для практических расчетов точностью. Таким образом, в этих случаях  $Z_{0п}$  мало.

Для схемы, изображенной на рис. 2.9, *б*, определение  $Z_{0п}$  со стороны обмотки  $Y$  не имеет смысла, так как  $I_{A0} = 0$ , а со стороны обмотки  $Y_0$

$$Z_{0п} = Z_2 + Z_{m0} = Z_{00}. \quad (2.27)$$

При этом для броневых, бронестержневых и групповых трансформаторов  $Z_{m0} = Z_m$ , поэтому  $Z_{0п}$  велико и равно сопротивлению холостого хода для токов прямой последовательности:

$$Z_{0п} = Z_0. \quad (2.28)$$

Для трехстержневого трансформатора (рис. 2.9, *б*)  $Z_k < Z_{0п} < Z_0$ .

Для случая, проиллюстрированного рис. 2.9, *в*, определение  $Z_{0п}$  со стороны обмотки  $\Delta$  также не имеет смысла, так как в линейных токах составляющая ну-

левой последовательности не содержится, а со стороны обмотки  $Y_0$

$$Z_{0n} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_{m0}}{Z_2 + Z_{m0}}. \quad (2.29)$$

Таким образом, в различных трансформаторах  $Z_{0n}$  изменяется в пределах от сопротивления короткого замыкания  $Z_k$  сопротивления холостого хода  $Z_0$ .

При экспериментальном определении  $Z_{0n}$  в обмотках необходимо создать токи

$$I_a = I_b = I_c = I_{0n}. \quad (2.30)$$

Для этого три фазы обмотки можно соединить последовательно (рис. 2.10, а) или параллельно (рис. 2.10, б). Первый случай соответствует включению источника напряжения в рассечку «треугольника», а второй – его включению в нулевой провод, когда обмотка соединена в «звезду».

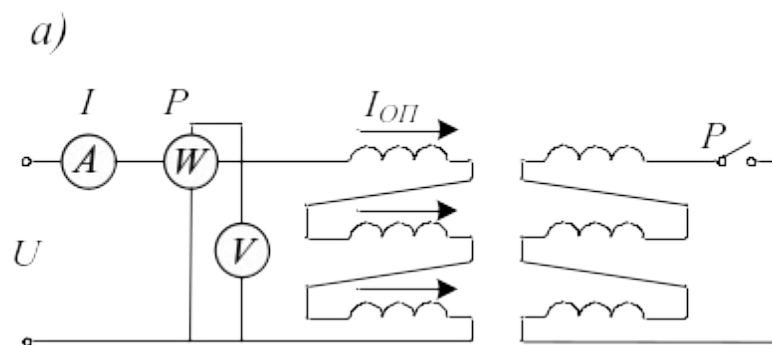
Схема соединений вторичной обмотки может также иметь два варианта. Первый вариант (рис. 2.10, а) предпочтителен, так как соблюдение равенства (2.30) при этом обеспечено при всех условиях. Рубильник Р на схемах, изображенных на рис. 2.10, должен быть замкнут в случае, когда во вторичной обмотке возможно существование токов нулевой последовательности (соединение  $\Delta$  или  $Y_0$  с незначительным сопротивлением нулевого провода), и разомкнут при соединении  $Y$ .

В схеме, приведенной на рис. 2.10, а,

$$z_{0n} = \frac{U}{3 \cdot I}; \quad r_{0n} = \frac{P}{3 \cdot I^2}; \quad x_{0n} = \sqrt{z_{0n}^2 - r_{0n}^2}, \quad (2.31)$$

а в схеме, приведенной на рис. 2.10, б,

$$z_{0n} = \frac{3U}{I}; \quad r_{0n} = \frac{3P}{I^2}; \quad x_{0n} = \sqrt{z_{0n}^2 - r_{0n}^2}, \quad (2.32)$$



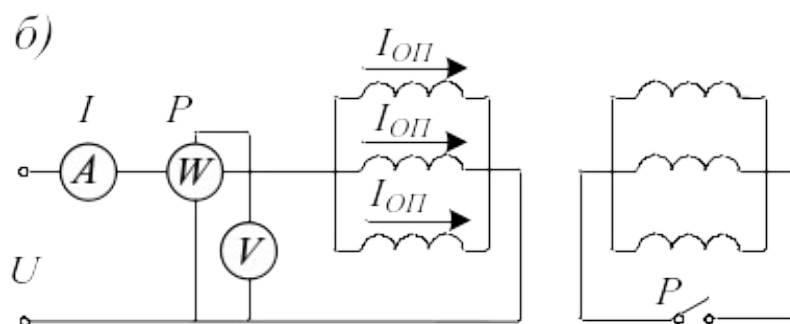


Рис. 2.10. Схемы опытного определения сопротивления нулевой последовательности

В мощных трансформаторах обычно  $r_{0п} \ll x_{0п}$  и  $Z_{0п} = x_{0п}$ .

## 2.11. Параллельная работа трансформаторов

Параллельная работа трансформаторов необходима по тем же причинам, что и параллельная работа генераторов:

а) обеспечение резервирования при энергоснабжении потребителей в случае аварии и необходимости ремонта трансформаторов;

б) уменьшение потерь энергии в периоды малых нагрузок подстанции путем отключения части параллельно работающих трансформаторов.

При эксплуатации параллельно включенных трансформаторов важно, чтобы нагрузка между ними распределялась пропорционально их номинальным мощностям. Сформулируем требования к трансформаторам, при выполнении которых эти условия выполняются.

Пусть параллельно включены  $n$  трехфазных трансформаторов, имеющих разные номинальные мощности  $S_{н1}$ ;  $S_{нII}$ ;  $S_{нn}$ . На рис. 2.11, а представлена однолинейная схема включения трехфазных трансформаторов, в равной степени относящаяся к любой из фаз трехфазной схемы.

Параллельную работу трансформаторов принято считать идеальной, если возможно осуществить режим максимальной нагрузки так, чтобы ее полная мощность  $S_{max}$  была равна сумме номинальных мощностей всех трансформаторов:

$$S_{max} = S_{н1} + S_{нII} + \dots + S_{нn}. \quad (2.33)$$

Идеальные условия, как видно из рис. 2.11, соответствуют полному использованию каждого из параллельно включенных трансформаторов. Условие (2.33) может быть выполнено, если дополнительно соблюдены условия:

1. Ток нагрузки  $I$  (рис. 2.11) равен арифметической сумме вторичных токов трансформаторов  $I_{2I}$ ,  $I_{2II}$ , ...,  $I_{2n}$  или, другими словами, если все вторичные токи совпадают по фазе.

2. При увеличении нагрузки каждый трансформатор нагружается пропорционально его номинальной мощности.

3. При отсутствии нагрузки ( $I = 0$ ) вторичные токи трансформаторов

также равны нулю.

Для выполнения условия 3, очевидно, необходимо, чтобы вторичные линейные напряжения всех трансформаторов имели одинаковое значение и совпадали по фазе, то есть чтобы трансформаторы принадлежали к одной группе и имели одинаковые коэффициенты трансформации. Выполнимость условий 1 и 2 легко установить из схемы замещения параллельно работающих трансформаторов, представленной на рис. 2.11, б. Видно, что вторичные токи трансформаторов  $I_{2I}'$ ,  $I_{2II}'$ , ...,  $I_{2n}'$  будут совпадать по фазе, если аргументы сопротивлений короткого замыкания  $Z_{кI}$ ,  $Z_{кII}$ , ...,  $Z_{кn}$  будут одинаковыми.

При нагрузке каждый трансформатор будет нагружаться пропорционально своей номинальной мощности, если относительные значения их сопротивлений короткого замыкания  $Z_{кI}$ ,  $Z_{кII}$ , ...,  $Z_{кn}$  (или напряжения короткого замыкания) будут равны.

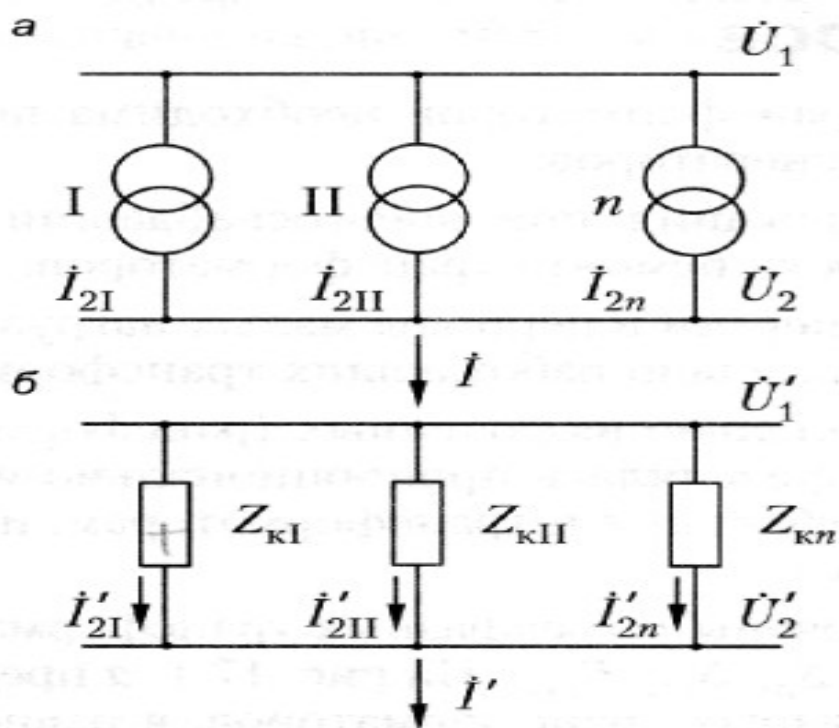


Рис. 2.11. Распределение нагрузок между  $n$  параллельно включенными трансформаторами: а) схема включения трансформаторов, б) схема замещения

Итак, идеальные условия параллельной работы трансформаторов можно сформулировать следующим образом:

- 1) трансформаторы должны иметь обмотки одной и той же группы соединения;
- 2) трансформаторы должны обладать одинаковыми коэффициентами трансформации;
- 3) напряжения короткого замыкания и их составляющие должны быть одинаковыми у всех трансформаторов.

Однако в практике эксплуатации трансформаторов выполнить эти идеаль-



ные условия удается не всегда.

## **2.12. Разновидности трансформаторов**

### **2.12.1. Многообмоточные трансформаторы**

Кроме двухобмоточных силовых трансформаторов промышленность выпускает большое количество трансформаторов, имеющих три обмотки.

Такие трансформаторы используются на электрических станциях и подстанциях для питания распределительных сетей с различными номинальными напряжениями с целью экономии капитальных затрат за счет меньшего количества трансформаторов. Кроме того, выпускается много маломощных трансформаторов, имеющих несколько обмоток, рассчитанных на разные напряжения. В таких трансформаторах все обмотки располагаются на одном магнитопроводе, за счет чего и достигается экономия затрат. Понятно, что в таких трансформаторах электромагнитные процессы могут протекать несколько иначе, чем в двух обмоточных трансформаторах, из-за магнитной связи всех обмоток. На каждом стержне трансформатора располагаются три обмотки, причем ближе к стержню располагается обмотка низшего напряжения. Трехобмоточные трансформаторы, как и двухобмоточные, в большинстве случаев выполняются трехфазными.

### **2.12.2. Автотрансформаторы**

Автотрансформатором называют такой трансформатор, в котором первичные и вторичные обмотки помимо электромагнитной связи имеют также электрическую связь.

В конструктивном отношении силовые автотрансформаторы практически не отличаются от трансформаторов. Обмотки автотрансформатора располагаются на стержнях магнитопровода. Большинство деталей автотрансформатора структурно похожи на аналогичные детали трансформатора. Активная часть силового автотрансформатора обычно также помещается в наполненном маслом баке.

На рис. 2.12 представлены две из возможных схем соединения обмоток автотрансформатора. Однако при электрическом соединении двух обмоток в автотрансформаторе понятие первичной и вторичной обмоток становится условным. Поэтому обмотку, на зажимах которой действует входное ( $U_{вх}$ ) или выходное ( $U_{вых}$ ) напряжение, часто называют общей, или параллельной, обмоткой. Обмотку, включенную последовательно с источником или приемником, называют последовательной. Следуя уже принятой для трансформаторов терминологии, будем впредь параллельную обмотку называть первичной ( $\omega_1$ ), а последовательную – вторичной ( $\omega_2$ ).

ЭДС и токи в обмотках автотрансформатора преобразуются так же, как и в обычных трансформаторах, и связаны соотношениями

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k_{\text{ат}}. \quad (2.34)$$

Коэффициент  $k_{\text{ат}}$  иногда называют коэффициентом автотрансформации.

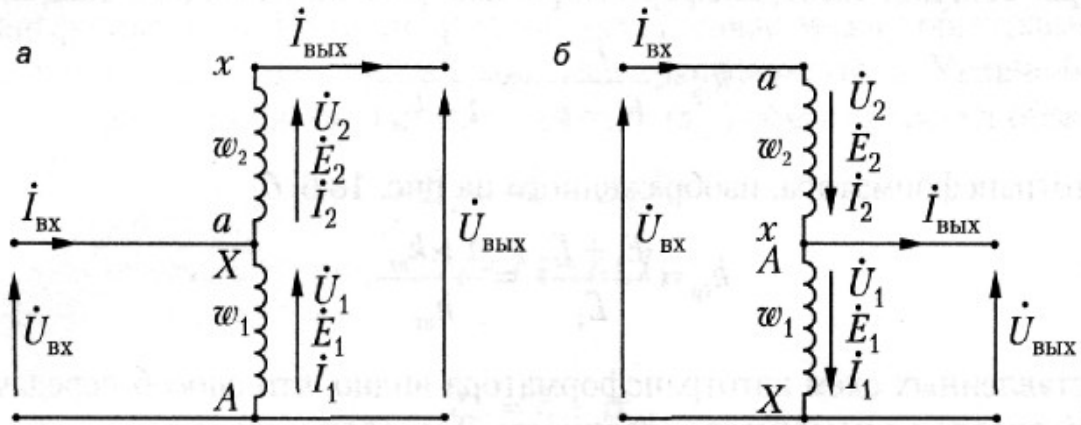


Рис. 2.12. Схемы однофазных автотрансформаторов:  
а) повышающего, б) понижающего

Наличие последовательной (вторичной) обмотки с индуцированной в ней ЭДС позволяет получить различные соотношения между  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ . Так, для схемы, приведенной на рис. 2.12, а,

$$\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{E_1}{E_1 + E_2} < 1. \quad (2.35)$$

Автотрансформатор, для которого характерно такое соотношение, называется повышающим.

Для схемы, приведенной на рис. 2.12, б,

$$\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{E_1 + E_2}{E_1} > 1. \quad (2.36)$$

Такое соотношение характерно для понижающего автотрансформатора.

Таким образом, характер преобразования напряжения (понижение или повышение) в автотрансформаторе зависит только от схемы электрического соединения обмоток. Разумеется, что на величину самого отношения влияет и соотношение чисел витков обмоток. Поэтому в автотрансформаторе различают два коэффициента трансформации, определяемые отношениями:

1) чисел витков обмоток

$$k_{\text{ат}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (2.37)$$

2) входного и выходного напряжений

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}}. \quad (2.38)$$

Нетрудно установить и связь между  $k_{\text{ат}}$  и  $k_{\text{тр}}$  для рассмотренных схем автотрансформатора. Так, для автотрансформатора, изображенного на рис. 2.12, а,

$$k_{\text{тр}} = \frac{E_1}{E_1 + E_2} = \frac{k_{\text{ат}}}{1 + k_{\text{ат}}}, \quad (2.39)$$

а для автотрансформатора, изображенного на рис. 2.12, б,

$$k_{\text{тр}} = \frac{E_1 + E_2}{E_1} = \frac{1 + k_{\text{ат}}}{k_{\text{ат}}}. \quad (2.40)$$

Из представленных схем автотрансформатора видно, что способ передачи электрической энергии в нем имеет особенность. Так, если в трансформаторе энергия передается электромагнитным путем, через магнитное поле в сердечнике, то в автотрансформаторе таким путем передается лишь ее часть. Другая часть энергии поступает к приемнику непосредственно через электрическое соединение первичной и вторичной обмоток автотрансформатора. В связи с этим различают:

1) внешнюю, или проходную, мощность автотрансформатора на первичной ( $S_1$ ) и вторичной ( $S_2$ ) сторонах автотрансформатора, передаваемую из одной сети ( $U_{\text{вх}}$ ) в другую ( $U_{\text{вых}}$ ) и равную

$$S = S_1 = m U_{\text{вх}} I_{\text{вх}} \approx S_2 = m U_{\text{вых}} I_{\text{вых}}; \quad (2.41, a)$$

внутреннюю, или расчетную, электромагнитную мощность автотранс-

2)

форматора, представляющую собой полную электромагнитную мощность его обмоток и равную

$$S_p = E_1 I_1 = E_2 I_2. \quad (2.41, б)$$

Соотношение между  $S$  и  $S_p$  зависит от коэффициентов трансформации. Например, для схемы, представленной на рис. 2.12, а,

$$\frac{S_p}{S} = \frac{E_2 I_2}{U_{\text{вых}} I_{\text{вых}}} = \frac{E_2}{E_1 + E_2} = \frac{1}{1 + k_{\text{ат}}} = (1 - k_{\text{тр}}), \quad (2.42, a)$$

а для схемы, представленной на рис. 2.12, б,

$$\frac{S_p}{S} = \frac{E_2 I_2}{U_{\text{вх}} I_{\text{вх}}} = \frac{E_2}{E_1 + E_2} = \frac{1}{1 + k_{\text{ат}}} = \frac{k_{\text{тр}} - 1}{k_{\text{тр}}}, \quad (2.42, б)$$

Как видно из выражений (2.42), расчетная электромагнитная мощность автотрансформатора при небольших  $k_{\text{тр}}$  может быть заметно меньше, чем в

трансформаторе. Автотрансформатор в этом случае будет иметь меньшие габаритные размеры. Вследствие этого и потери в автотрансформаторе будут меньше, чем в трансформаторе, рассчитанном на такую же мощность. Таким образом, преобразование электрической энергии с напряжения  $U_{вх}$  на напряжение  $U_{вых}$ , мало отличающееся от  $U_{вх}$ , наиболее экономично решается с помощью автотрансформатора.

Рабочие процессы в автотрансформаторах анализируются на основе общей теории трансформаторов. Получаемая упрощенная схема замещения автотрансформатора имеет вид, представленный на рис. 2.13. Сопротивление  $Z_э$  в этой схеме составляет:

а) для понижающего автотрансформатора

$$Z_э = \frac{Z_k}{k_{ам}^2}; \quad (2.43, a)$$

б) для повышающего автотрансформатора

$$Z_э = Z_k \frac{1}{(1+k_{ам})^2}. \quad (2.43, б)$$

Видно, что упрощенная схема замещения автотрансформатора практически аналогична схеме замещения обычного трансформатора. Отличие заключается в том, что при приведении сопротивления  $Z_k$  используется коэффициент  $k_{ат}$ , а при приведении величин вторичной обмотки к первичной – коэффициент  $k_{тр}$ . Заметим, что сопротивление  $Z_k$  автотрансформатора меньше, чем у трансформатора, что приводит к увеличению тока короткого замыкания, однако в этом случае уменьшается падение напряжения на обмотках автотрансформатора и увеличивается КПД передачи энергии.

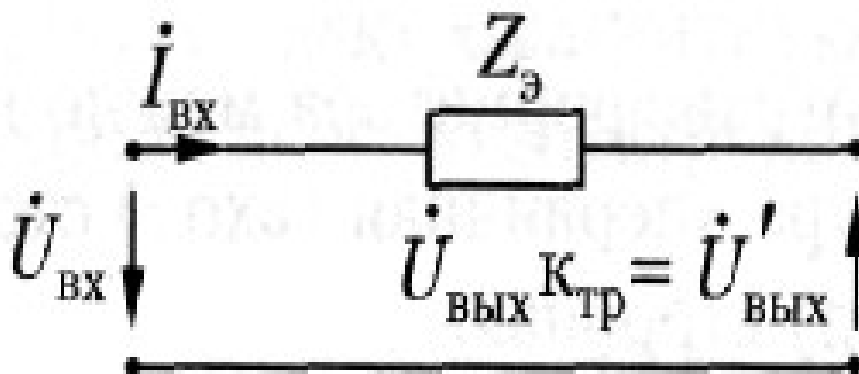


Рис. 2.13. Упрощенная схема замещения автотрансформатора

Наряду с однородными двухобмоточными автотрансформаторами часто применяются трехфазные двухобмоточные и трехфазные трехобмоточные автотрансформаторы.

### 2.12.3. Трансформаторы специального назначения

### 2.12.3.1. Сварочные и печные трансформаторы

Для электрической дуговой сварки применяют трансформаторы со вторичным напряжением, обеспечивающим надежное зажигание и устойчивое горение дуги. Для ручной сварки используются трансформаторы с напряжением при холостом ходе 60-75 В и при номинальной нагрузке – 30 В. Для ограничения сварочного тока при коротком замыкании, а также для устойчивого горения дуги трансформатор должен иметь круто падающую внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$ , а сварочная цепь – значительную индуктивность  $\cos \varphi = 0,4-0,5$ . Для регулирования величины сварочного тока эта индуктивность должна быть регулируемой.

Широко используются сварочные трансформаторы с дополнительной регулируемой реактивной катушкой (рис. 2.14).

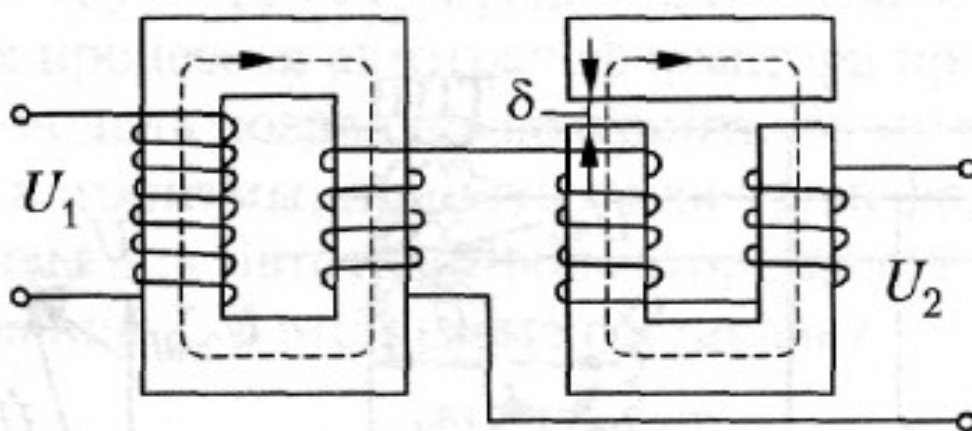


Рис. 2.14. Сварочный трансформатор с реактивной катушкой

При уменьшении зазора  $\delta$  в магнитной цепи катушки ее индуктивность возрастает.

Однопостовые трансформаторы для ручной дуговой сварки изготавливаются мощностью до 20 кВ · А, а для автоматической сварки – до 100 кВ · А и более. Для контактной электросварки выпускаются трансформаторы мощностью до 1000 кВ·А при напряжении холостого хода до 36 В.

Для дуговых сталеплавильных печей применяются трехфазные трансформаторы мощностью до 25 000 кВ · А, со ступенчатым регулированием вторичного напряжения в пределах 110-420 В. Напряжение регулируется комбинированием следующих приемов:

- 1) переключением первичной обмотки со «звезды» на «треугольник»;
- 2) устройством отводов в первичной обмотке;
- 3) переключением отдельных групп вторичных витков с параллельного соединения на последовательное.

### 2.12.3.2. Выпрямительные трансформаторы

Условия работы трансформаторов, питающих ионные и полупроводнико-

вые выпрямители, имеют ряд существенных особенностей, которые должны быть приняты во внимание при их проектировании и эксплуатации.

В выпрямительных установках отдельные вентили и фазы вторичной обмотки трансформатора работают поочередно. Поэтому в каждый момент времени трансформатор нагружен несимметрично, и необходимо выбрать такую схему соединения обмоток, которая обеспечивает нормальные условия намагничивания сердечника трансформатора и равновесие МДС на каждом стержне. Из-за того что отдельные фазы работают поочередно, вторичные и первичные токи трансформатора несинусоидальны и содержат ряд высших гармоник. В общем случае гармонический состав первичных и вторичных токов различается, и поэтому полные мощности  $mUI$  обмоток также различны.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения и тока, а также для уменьшения гармоник тока в первичной обмотке целесообразно увеличивать число фаз вторичной обмотки трансформатора.

В ионных многоанодных вентилях возможны так называемые обратные зажигания, когда дуги возникают между отдельными анодами, что эквивалентно короткому замыканию. При этом возможны нарушения равновесия МДС первичных и вторичных обмоток, что приводит к возникновению весьма значительных электромагнитных сил, действующих на обмотки. Поэтому крепление обмоток выпрямительных трансформаторов должно быть особенно надежным.

Для мощных промышленных установок чаще всего применяются трансформаторы с шестифазной вторичной обмоткой (рис. 2.15) и с уравнивающей реактивной катушкой между нейтральями «прямой» и «обратной» трехфазных групп вторичной обмотки. Назначение этой катушки заключается в том, что она в каждый момент времени обеспечивает параллельную работу двух вентиляей и двух «соседних» фаз вторичной обмотки, имеющих сдвиг ЭДС  $60^\circ$ .

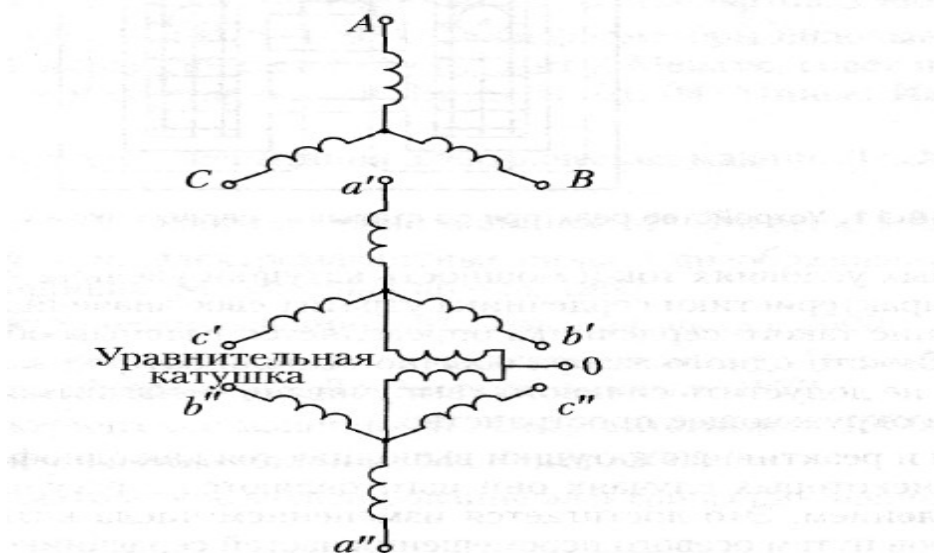


Рис. 2.15. Схема шестифазного выпрямительного трансформатора с уравнивающей катушкой

Этим достигается лучшее использование трансформатора. Такой режим работы обеспечивается тем, что ЭДС, индуцируемые в двух половинках катуш-

ки, выравнивают напряжения в цепях одновременно работающих двух фаз.

### 2.12.3.3. Реакторы и реактивные катушки

Реакторы и реактивные катушки со стальным сердечником, в сущности, не являются трансформаторами, однако по своему устройству аналогичны им. Они имеют только одну обмотку и применяются в электрических цепях в качестве токоограничивающих индуктивных сопротивлений и потребителей реактивной мощности. Реактивные катушки большой мощности называют *реакторами*.

Можно представить, что реактивная катушка получается в результате удаления из трансформатора вторичной обмотки. При этом она работает как трансформатор на холостом ходу. Однако такая катушка будет иметь относительно малую мощность  $S = mUI$ , так как ток холостого хода трансформатора мал. При этом материалы катушки будут в значительной степени недоиспользованы, а кроме того, индуктивность катушки будет непостоянной и при синусоидальном напряжении ток не будет синусоидальным. Лучшие результаты получаются, если в магнитной цепи выполнить немагнитные зазоры в виде прокладок из изоляционного материала (рис. 2.16).

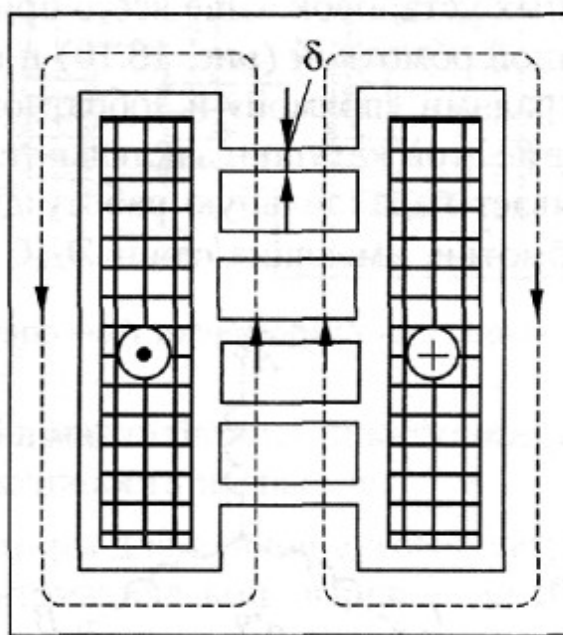


Рис. 2.16. Устройство реактора со стальным сердечником и воздушным зазором  $\delta$

При данных условиях ток и мощность катушки увеличатся, а нелинейность магнитной характеристики сердечника утратит свое значение, так как магнитное сопротивление такого сердечника определяется главным образом сопротивлением зазоров. Вместо одного зазора обычно выполняют ряд зазоров меньшего размера, чтобы не допустить сильного «выпучивания» магнитного поля из области сердечника в окружающее пространство.

Реакторы и реактивные катушки выполняются как однофазными, так и трехфазными. В некоторых случаях они изготавливаются с регулируемым индук-

тивным сопротивлением. Это достигается изменением числа витков и размера воздушных зазоров путем осевого перемещения частей сердечников. Применяются также реактивные катушки с подмагничиванием сердечника постоянным током. В этом случае сердечники выполняются без зазоров.

В различных сферах хозяйственной деятельности находят применение и другие разновидности трансформаторов специального назначения.

## Глава 3. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 3.1. Конструкция и принцип действия

Электрической машиной постоянного тока принято считать машину, которая генерирует в сеть или потребляет из нее постоянный ток. Работа машины постоянного тока основана на законе электромагнитной индукции. Электромагнитная схема машины постоянного тока приведена на рис. 3.1.

Индуктор состоит из главных полюсов (ГП), станины (ядро) и дополнительных полюсов (ДП). Главные полюса создают основной магнитный поток в машине, для чего на них устанавливаются либо постоянные магниты (электрические машины с магнитоэлектрическим возбуждением), либо катушки возбуждения, токи которых обеспечивают требуемое значение основного магнитного потока машины.

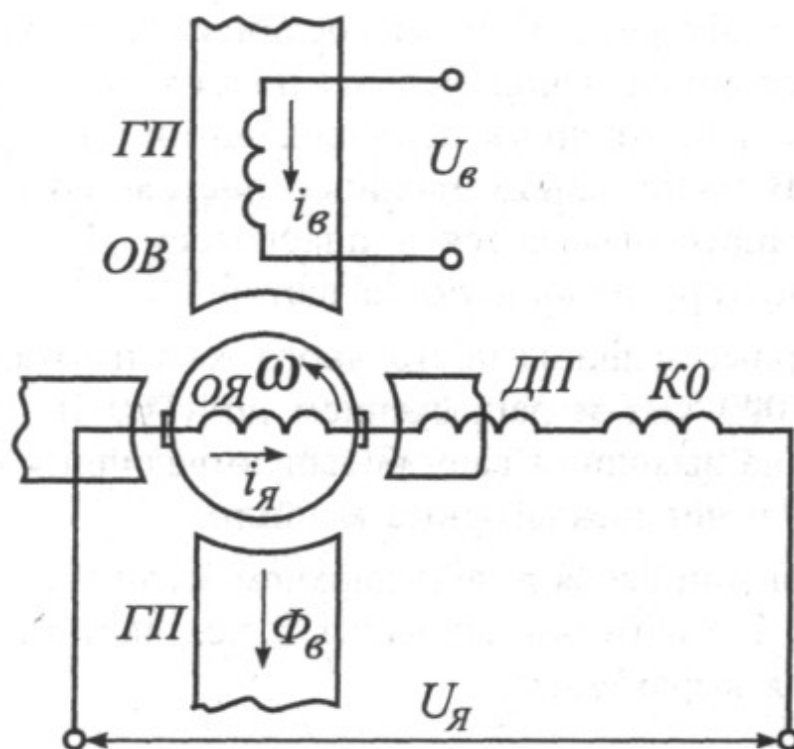


Рис. 3.1. Электромагнитная схема машины постоянного тока

Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюса чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек возбуж-



дения отдельных полюсов. Мощность, потребляемая цепями возбуждения, составляет примерно 0,5-3,0% от номинальной мощности машины постоянного тока. Причем с увеличением мощности машины относительная величина потеря мощности на возбуждение падает. Сердечники полюсов изготовлены в виде пакета из листов электротехнической стали толщиной 0,5-1,0 мм. Крепление главных полюсов к ядру осуществляется с помощью болтов.

Так как машина постоянного тока является электромеханическим преобразователем одного вида энергии в другой и работает на основании электромагнитной индукции, очевидно, необходимо, чтобы хотя бы по части ее обмоток протекал переменный ток. В машине постоянного тока эту функцию выполняет якорная обмотка, которая уложена в пазы сердечника якоря, изготовленного в виде пакета из листов электротехнической стали.

Для получения переменного тока в обмотке якоря на валу машины устанавливается механический коммутатор – коллекторно-щеточный узел. Якорная обмотка соединяется с коллектором, который представляет собой набор медных пластин толщиной 3-15 мм, изолированных друг от друга не проводящими ток прокладками толщиной 1 мм. В маломощных машинах постоянного тока коллекторные пластины запрессовываются в пластмассу. Для подвода (и отвода) тока к коллектору используются щетки.

Одноякорные машины постоянного тока изготавливаются мощностью до 10 МВт и напряжением до 1000 В. При необходимости обеспечить на выходном валу большую величину мощности строятся двух-, трех- и четырехъякорные машины.

При вращении якоря в неподвижном магнитном поле со скоростью  $n$  в секциях его обмотки наводится ЭДС, частота изменения которой определяется

$$f_2 = \frac{pn}{60}$$

выражением

Коллектор преобразует переменную ЭДС (рис. 3.2), индуктированную в последовательно соединенных секциях якорной обмотки, в постоянную ЭДС  $E$  между коллекторными щетками А и В. Посредством этих щеток вращающаяся обмотка якоря соединяется с внешней цепью постоянного тока. Между диаметрально расположенными щетками А и В, как это видно из рис. 3.2 б, действует переменное напряжение, вектор которого не изменяется во времени и равен для верхней и нижней ветвей якорной обмотки величине  $E$ .

Для уменьшения пульсации ЭДС при переходе щеток с одной коллекторной пластины на другую в каждую параллельную ветвь обмотки якоря обычно включается не менее 16 активных проводников.

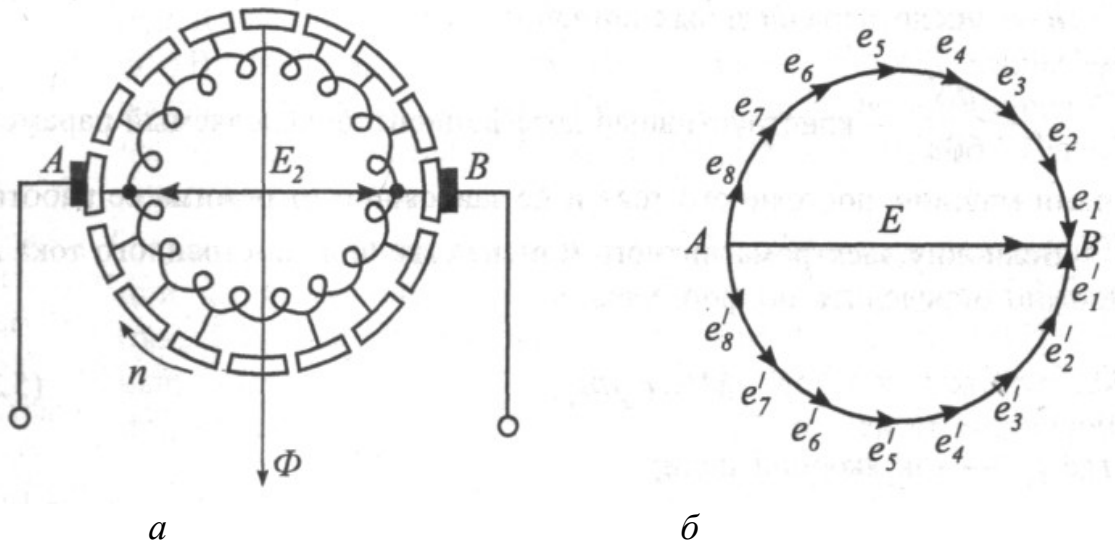


Рис. 3.2. Образование ЭДС якоря

### 3.2. ЭДС вращения и момент машины постоянного тока

Из рис. 3.2, б видно, что при одинаковых параметрах нижней и верхней ветвей якорной обмотки и разомкнутой внешней цепи ток в обеих ветвях равен нулю, потому что ЭДС, действующие в обеих ветвях, направлены навстречу и равны друг другу. Максимальное же значение ЭДС будет в случае установки щеток по линии геометрической нейтральной (линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси главных полюсов). На этой линии и устанавливаются, как правило, щетки А и В. При вращении якоря машины вектор ЭДС  $E$  изменяться не будет, а величина его модуля определится выражением:

$$E = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} e_i = v_a l_a \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_x = c_e \omega \Phi \quad (3.1)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток;  $v_a$  – окружная скорость якоря;  $l_a$  – длина части проводника, пересекаемой линиями магнитного поля;  $B_x$  – магнитная индукция в точке  $x$  воздушного рабочего зазора машины;  $N$  – число активных проводников якорной обмотки;  $a$  – число параллельных ветвей;  $c_e = pn/60a$  – конструктивный коэффициент, определяемый параметрами машины постоянного тока и не зависящий от режима ее работы.

Величину электромагнитного момента машины постоянного тока  $M$  можно определить по формуле:

$$M = c_e \Phi i_{я} \quad (3.2)$$

где  $i_{я}$  – ток якорной цепи;  $c_e$  – конструктивный коэффициент машины.

Так как направление тока якоря зависит от режима работы машины (двигатель или генератор), то и момент двигателя будет либо тормозным (генераторный режим), либо вращающим (двигательный режим).

### 3.3. Реакция якоря машины постоянного тока

Электромагнитный момент машины постоянного тока является результатом взаимодействия намагничивающих сил обмоток возбуждения и якоря. Под влиянием поля якоря характер результирующего магнитного поля в рабочем зазоре машины искажается. Это явление принято называть реакцией якоря. Если магнитная цепь машины не насыщена, то поперечная реакция якоря лишь искажает картину поля в рабочем зазоре, однако величина магнитного потока остается практически неизменной.

С целью улучшения массогабаритных показателей машин постоянного тока индукцию в рабочем зазоре повышают до такой степени, что рабочая точка кривой намагничивания машины находится вблизи участка насыщения. В этом случае увеличение потока на краю ГП, где поля суммируются, будет меньше, чем его уменьшение на том краю, где они вычитаются. Это объясняется тем, что насыщение проявляется в большей степени в той части ГП, где поля складываются. В результате поток ГП уменьшается, иными словами, поперечная реакция якоря размагничивает машину.

В некоторых случаях, когда магнитный поток ГП ослаблен, размагничивающее действие поперечной реакции якоря может привести к изменению направления («опрокидыванию») поля под одним краем полюса. Поэтому в машинах постоянного тока с мощностью, большей 50 кВт, величину рабочего зазора выбирают такой, чтобы при максимальной нагрузке не происходило «опрокидывания» поля. С этой же целью в мощных машинах величину зазора на краю ГП делают большей, чем в центре.

Самым эффективным средством борьбы с вредным влиянием реакции якоря является использование компенсационной обмотки (КО) (рис. 3.1). Эта обмотка размещается в пазах башмаков ГП. Величина и направление тока в этой обмотке выбираются из условия нейтрализации искажения формы в рабочем зазоре от действия реакции якоря.

В случае, если ферромагнитный сердечник КО изготовлен из литой стали, при скачках тока якоря магнитное поле компенсационной обмотки вследствие экранирующего действия вихревых токов отстает от магнитного поля реакции якоря. Поэтому целесообразно в качестве ферромагнитного сердечника КО использовать листовую электротехническую сталь.

Компенсационная обмотка требует большого расхода обмоточного провода и потому используется лишь в случаях, когда машина предназначена для работы в тяжелых условиях эксплуатации.

### 3.4. Коммутация коллекторной машины постоянного тока

Процесс коммутации связан с переходом секции обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и с происходящим при этом изменением направления тока в этой секции. В начале процесса коммутации секция якорной обмотки замыкается накоротко, а в конце – она включается в цепь другой ветви

якорной обмотки. Качество коммутации в значительной степени определяет работоспособность машины и ее эксплуатационную надежность. Коммутация приводит к искрению под щетками. Помимо электромагнитных причин на качество коммутации влияют причины механические. Борьба с механическими причинами в силу целого ряда обстоятельств весьма затруднительна. Электромагнитные причины вызваны неудовлетворительным характером протекания тока в короткозамкнутой секции. Изменив этот характер, можно значительно улучшить коммутацию коллекторной машины.

В современных машинах постоянного тока средняя скорость изменения тока коммутируемой секции очень велика. Поэтому в ней может возникать значительная величина ЭДС как от действия коммутации самой секции, так и от коммутации секций, находящихся под соседними полюсами, если стороны этих секций имеют взаимоиндуктивную связь, вызванную расположением коммутируемых секций в общих пазах.

Обычно ЭДС само- и взаимоиндукции объединяют в общую, так называемую реактивную ЭДС. В машинах мощностью выше 5 кВт эта ЭДС имеет значительную величину. Потому компенсацию этой ЭДС осуществляют с помощью дополнительных полюсов (ДП) (рис. 3.1), которые создают внешнее поле необходимой интенсивности и направления:

$$e_p + e_k = 0, \quad (3.3)$$

где  $e_p$ ,  $e_k$  – реактивная и коммутирующая ЭДС.

Дополнительные полюса имеют узкие сердечники, которые крепятся болтами к ярму между ГП. Обмотку дополнительных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, сечение магнитопровода должно обеспечить отсутствие насыщения в нем. Поэтому при номинальной нагрузке величина индукции не должна превышать 1 Тл. Сердечники изготавливаются литыми либо шихтованными. Дополнительные полюса применяются в машинах с мощностью выше 0,3 кВт, их применение позволяет увеличить линейную нагрузку машины и тем самым улучшить ее массогабаритные показатели и уменьшить стоимость.

С целью уменьшения влияния на внешнюю аппаратуру помех, создаваемых коммутацией, производят симметрирование цепи якоря машины постоянного тока, для чего обмотку ДП разбивают на две части, которые подсоединяют к щеткам противоположной полярности. Между корпусом машины и щетками устанавливают конденсаторы для шунтирования высокочастотной составляющей напряжения на зажимах машины.

Коллекторные машины имеют ряд существенных недостатков:

а) опыт эксплуатации коллекторных машин показал, что в среднем 25% отказов (а в транспортном приводе и того больше – 44-66%) происходит по вине коллекторно-щеточного узла;

б) использование щеточного контакта в естественных условиях при высотах более 20 км практически невозможно, а в агрессивных средах наличие щеточного контакта вообще недопустимо;

в) условия коммутации не допускают превышения предельных линейных скоростей в контакте. Это не позволяет реализовать высокоэффективные конструкции электромеханических преобразователей, рассчитанные на предельные механические нагрузки и обладающие наилучшими массогабаритными характеристиками;

г) щеточный контакт резко снижает ресурс работы машины постоянного тока.

Все это объясняет появление в последнее десятилетие большого количества электрических машин с полупроводниковыми коммутаторами.

### 3.5. Потери мощности в электрических машинах постоянного тока

Потери в электрических машинах делятся на основные и добавочные. Основные определяются характером и интенсивностью электромагнитных и механических процессов. Добавочные же обусловлены различными вторичными явлениями при работе электрической машины в режиме нагрузки.

Основные потери подразделяются на механические, магнитные и электрические (в проводниках обмоток, переходном сопротивлении щеточных контактов) потери.

Механические потери в свою очередь делятся на потери в подшипниках, на трение в щетках и на вентиляцию самой машины. В электрической машине постоянного тока механические потери зависят только от скорости вращения выходного вала машины и не зависят от ее нагрузки. В машинах мощностью 10-500 кВт механические потери составляют 0,5-2,0% от номинальной мощности (меньшие значения соответствуют машинам большей мощности).

Магнитные потери вызваны действиями переменного и вращательного перемагничивания различных частей машин постоянного тока. Первый вид потерь относится к зубцам якоря, а второй – к сердечнику якоря машины постоянного тока. В обоих случаях магнитные потери состоят из потерь на гистерезис и вихревые токи и могут быть определены по формулам:

$$P_{мг} = P_{с.а} + P_{с.з} \quad (3.4)$$

$$P_{с.а} = (2.4 - 4.0) P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_a^2 G_{с.а}; \quad (3.5)$$

$$P_{с.з} = (1.7 - 2.0) P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_{з,ср}^2 G_{с.з}, \quad (3.6)$$

где  $P_{с.а}$ ,  $P_{с.з}$  – потери в спинке и зубцах якоря;  $P_{1,0/50}$  – удельные потери при  $B=1$  Тл и  $f=50$  Гц;  $f$  – частота перемагничивания стали;  $B_a$ ,  $B_{з,ср}$  – индукция в спинке якоря и средняя индукция в зубце; (2,4-4,0), (1,7-2,0) – коэффициенты, учитывающие увеличение суммарных потерь в спинке якоря и в зубце;  $G_{с.а}$ ,  $G_{с.з}$  – масса спинки якоря и зубцов;  $\beta = 1,2-1,5$  (коэффициент щеточного пере-

крытия).

Электрические потери в каждой из обмоток (возбуждения и якорной) определяются по формуле, представляющей собой произведение квадрата действующего значения тока на суммарное сопротивление обмотки. Согласно ГОСТ, сопротивления обмоток с различными классами изоляции должны соответствовать температуре этих обмоток при номинальном режиме работы машины.

Потери в переходных сопротивлениях щеточных контактов определяются выражением

$$P_{эл.щ} = \Delta U_{щ} I, \quad (3.7)$$

где  $\Delta U_{щ}$  – падение напряжения на переходных сопротивлениях между щеткой и коллектором.

Согласно ГОСТ для угольных и графитных щеток  $\Delta U_{щ} = 1$  В, а для металлоугольных – 0,3 В.

Добавочные потери в машине постоянного тока возникают вследствие искажения кривой магнитного поля от действия поперечной реакции якоря и действия коммутации. На практике, согласно ГОСТ, их величина равна: при отсутствии компенсационной обмотки 1%, а при наличии – 0,5% от отдаваемой мощности для генератора и подводимой мощности для двигателя.

### 3.6. Генераторы постоянного напряжения

Несмотря на то, что основная доля потребляемой электроэнергии приходится на переменный ток, имеется целый ряд областей техники (транспорт, предприятия химической, металлургической промышленности и т.д.), которым необходим постоянный ток. Этот ток может быть получен с помощью статических или электромеханических преобразователей энергии. В качестве электромашиного преобразователя энергии используются генераторы постоянного тока (ГПП):

- независимого возбуждения (обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока);
- параллельного возбуждения (с самовозбуждением);
- последовательного возбуждения (серийный);
- со смешанным возбуждением (компаундные).

Принципиальные схемы перечисленных ГПП изображены на рис. 3.3.

Основным их отличием является выполнение обмотки возбуждения: в генераторах независимого и параллельного возбуждения эта обмотка наматывается тонким проводом, в серийных и компаундных генераторах обмотки возбуждения и якоря имеют проводники одинакового сечения. Генераторы малой мощности иногда имеют магнитоэлектрическое (от постоянных магнитов) возбуждение, их характеристики аналогичны характеристикам генераторов независимого возбуждения.

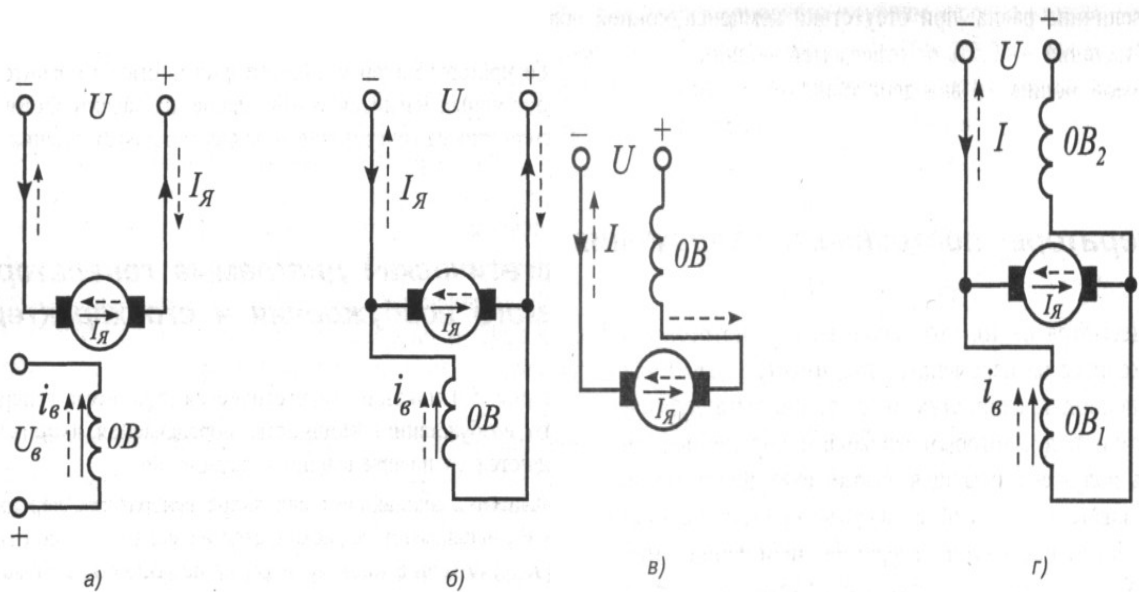


Рис. 3.3. Принципиальные схемы генераторов постоянного тока:  
 а) с независимым; б) с параллельным; в) последовательным;  
 г) смешанным возбуждением

### 3.7. Энергетическая диаграмма генератора независимого возбуждения и его характеристики

На рис. 3.4 показана энергетическая диаграмма генератора независимого возбуждения. Мощность, передаваемая в цепь возбуждения, расходуется на потери в цепи возбуждения.

Двигатель, вращающий вал якоря генератора, передает ему мощность  $P_1$  часть которой расходуется на механические ( $\Pi_{мх}$ ) и магнитные ( $\Pi_{мг}$ ) потери в машине, а также на дополнительные потери ( $\Pi_{\delta}$ ). Оставшаяся часть преобразуется в электромагнитную энергию, определяемую электромагнитной мощностью:

$$P_{эм} = I_{я} E = P_1 - (\Pi_{мх} + \Pi_{мг} + \Pi_{\delta}). \quad (3.8)$$

Мощность, отдаваемая генератором в электрическую сеть ( $P = UI_{я}$ ), равна разности электромагнитной мощности  $P_{эм}$  и потерь – в активных сопротивлениях цепи якоря ( $\Pi_{эл}$ ) и на переходе коллектор-щетка ( $\Pi_{эл.щ}$ ):

$$UI_{я} = I_{я} E - (I_{я}^2 R_{я} + \Delta U_{щ} I_{я}),$$

откуда

$$U = E - I_{я} R_{я\Sigma}, \quad (3.9)$$

где  $R_{я\Sigma}$  – суммарное сопротивление якорной цепи машины, учитывающее

сопротивление перехода коллектор-щетка.

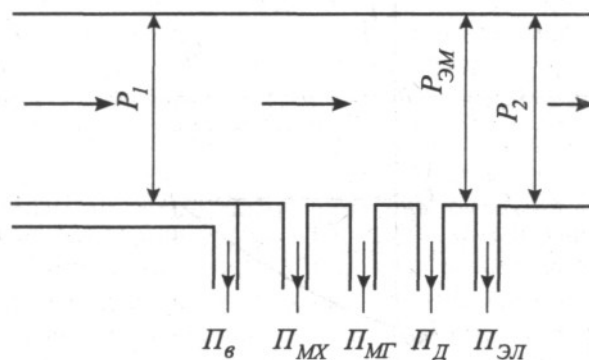


Рис. 3.4. Энергетическая диаграмма машины постоянного, тока

О свойствах генератора можно судить по его основным характеристикам: холостого хода, внешней, регулировочной и нагрузочной.

Под характеристикой холостого хода понимают зависимость выходного напряжения генератора от тока обмотки возбуждения в режиме холостого хода, т.е. при разомкнутой цепи нагрузки (при этом  $n = \text{const}$ , рис. 3.5, а).

При снятии характеристики щетки должны находиться на геометрической нейтрали. Изменение тока возбуждения следует производить только в одном направлении, т.к. в противном случае будет происходить переход на другие кривые намагничивания, не соответствующие снимаемому циклу. При больших значениях тока возбуждения генератора вследствие насыщения его магнитопровода кривая будет иметь резко выраженный участок насыщения. Точка характеристики, соответствующая номинальному режиму работы генератора, обычно лежит на колене кривой, т.к. работа генератора на прямолинейном участке неустойчива, а работа на участке ее насыщения не позволяет регулировать выходное напряжение.

При нулевом токе возбуждения генератора напряжение на его выходе составляет 2-4% от номинального значения.

Под внешней характеристикой понимается зависимость выходного напряжения от тока нагрузки  $U = f(I_a)$  при  $\eta = \text{const}$  и  $I_f = \text{const}$ . При снятии этой характеристики вначале устанавливаются номинальные ток возбуждения генератора  $i_f$  и ток нагрузки  $I_{ЯН}$ , затем генератор постепенно разгружается до режима холостого хода. По полученной кривой определяется падение напряжения  $U_n$  (рис. 3.5, б).

Уменьшение напряжения на выходе генератора независимого возбуждения с увеличением тока его нагрузки объясняется двумя причинами:

- 1) падением напряжения от протекания тока нагрузки во внутреннем сопротивлении генератора;
- 2) размагничивающим действием поперечной реакции якоря.
- 3) Изменение напряжения обычно определяется в процентах по отношению к номинальному напряжению:



$$4) \quad \Delta U = \frac{U_H - \Delta U_H}{U_H} 100\%$$

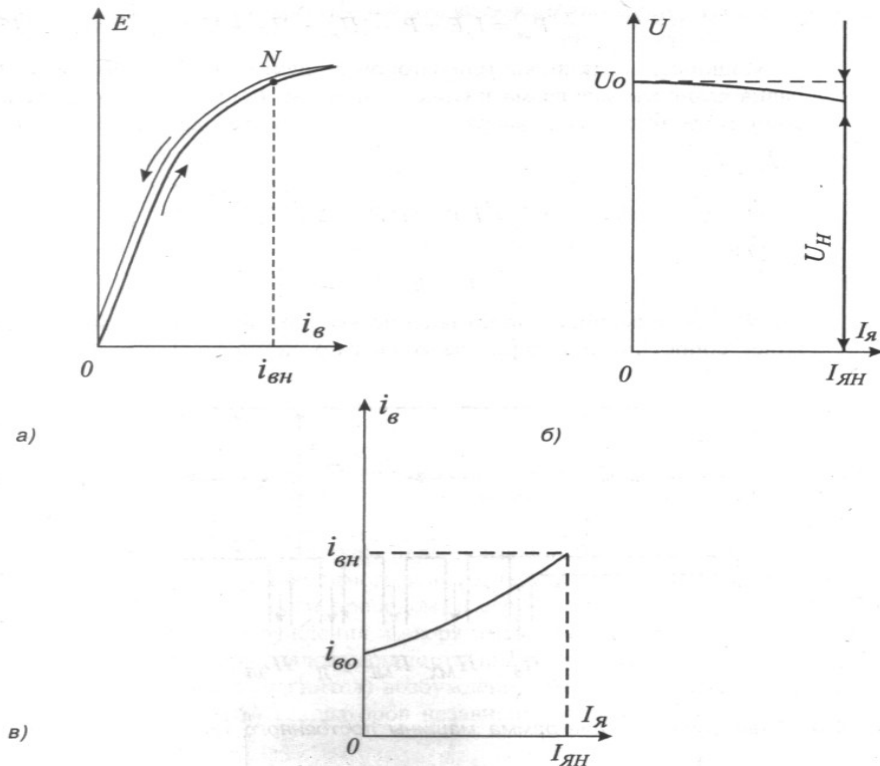


Рис. 3.5. Основные характеристики генератора постоянного тока:  
 а) холостого хода, б) внешняя и в) регулировочная

Регулировочная характеристика  $I_c = f(I_a)$  при  $n = const$  и  $U = const$  показывает, по какой зависимости необходимо увеличивать ток возбуждения (при увеличении тока нагрузки  $I_a$ ), чтобы при неизменной скорости вращения ротора выходное напряжение генератора оставалось неизменным (рис. 3.5, в).

Внешняя и регулировочная характеристики генератора могут быть построены по известным кривым нагрузочной характеристики:  $U = f(I_B)$  при  $n = const$  и  $I_a = const$  (рис. 3.6).

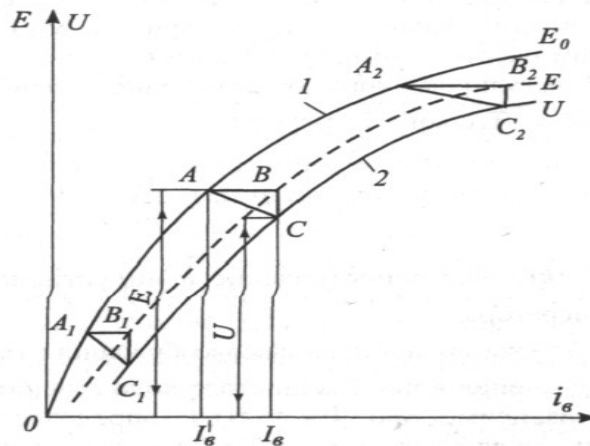


Рис. 3.6. Нагрузочная характеристика и характеристические треугольники генератора независимого возбуждения

Кривая 1 соответствует режиму холостого хода, а кривая 2 – режиму номинальной нагрузки ( $I_a = I_{ан}$ ). Прямоугольный треугольник ABC называют характеристическим. Катет BC этого треугольника пропорционален падению напряжения на активном сопротивлении якоря  $I_a R_{я\Sigma}$ , его величина остается неизменной ( $BC = B_1 C_1 = B_2 C_2$  и т.д.) при изменении тока возбуждения машины. Катет AB характеризует размагничивающее действие поперечной реакции якоря, его величина увеличивается по мере увеличения насыщения магнитной цепи генератора ( $A_1 B_1 < A B < A_2 B_2$  и т.д.). Основным достоинством генератора постоянного тока независимого возбуждения является возможность регулирования в широких пределах выходного напряжения изменением тока возбуждения, а недостатком – необходимость использования для питания обмотки возбуждения отдельного источника.

### 3.8. Генератор параллельного возбуждения

Схема генератора изображена на рис. 3.3, б. В отличие от генератора независимого возбуждения в данном случае не требуется отдельного источника питания. В этом типе генератора используется принцип самовозбуждения, который основывается на том, что в обесточенной машине существует небольшой – 1-3% от номинального остаточный поток  $\Phi_0$ . Если обмотка возбуждения включена так, что ее НС направлена согласно направлению остаточного потока, то при вращении ротора генератор входит в режим работы с током возбуждения  $i_e$  и ЭДС  $E$ , определяемыми величиной регулировочного сопротивления в цепи возбуждения. На основании II закона Кирхгофа

$$U = U_e = i_e R_e + L_e \frac{di_e}{dt}, \quad (3.10)$$

где  $R_e, L_e$  – активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения генератора.

На рис. 3.7 показан процесс самовозбуждения генератора.

Точка пересечения кривой холостого хода генератора 1 с прямой 2, являющейся зависимостью  $U_{R_e} = f(I_e)$ , определяет установившийся режим работы генератора (рис. 3.7). Переходный процесс изменения тока возбуждения, очевидно, характеризуется увеличением с течением времени падения напряжения на активном сопротивлении обмотки возбуждения. С ростом тока возбуждения от 0 до установившегося значения ЭДС возбуждения, очевидно, будет определяться изменением разности ординат кривых 1 и 2 при движении от 0 до точки  $A_1$ . Регулирование выходного напряжения генератора осуществляется изменением  $R_e$ . Сопротивление  $R_{e,кр}$ , при котором машина уже не возбуждается, называют критическим (кривая 3, рис. 3.7).

Ток возбуждения генератора параллельного возбуждения составляет всего 1-3% от номинального тока якоря, поэтому характеристика холостого хода

этого генератора практически совпадает с аналогичной характеристикой генератора независимого возбуждения. То же самое можно сказать о регулировочной и нагрузочной характеристиках генератора.

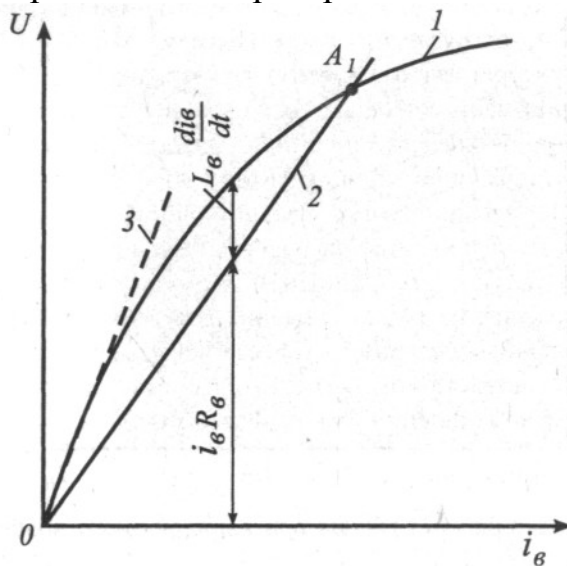


Рис. 3.7. Процесс самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рис. 3.8) представляет собой зависимость выходного напряжения  $U$  от тока нагрузки  $I_n$ ,  $U = f(I_n)$ , при  $n = \text{const}$  и неизменной величине сопротивления в цепи возбуждения  $R_g = \text{const}$ .

Помимо падения напряжения в цепи якоря и влияния реакции якоря в этом случае на характер внешней характеристики влияет уменьшение магнитного потока с ростом нагрузки. Поэтому внешняя характеристика этого типа генератора (кривая 1, рис. 3.8) располагается ниже аналогичной характеристики генератора независимого возбуждения (кривая 2, рис. 3.8).

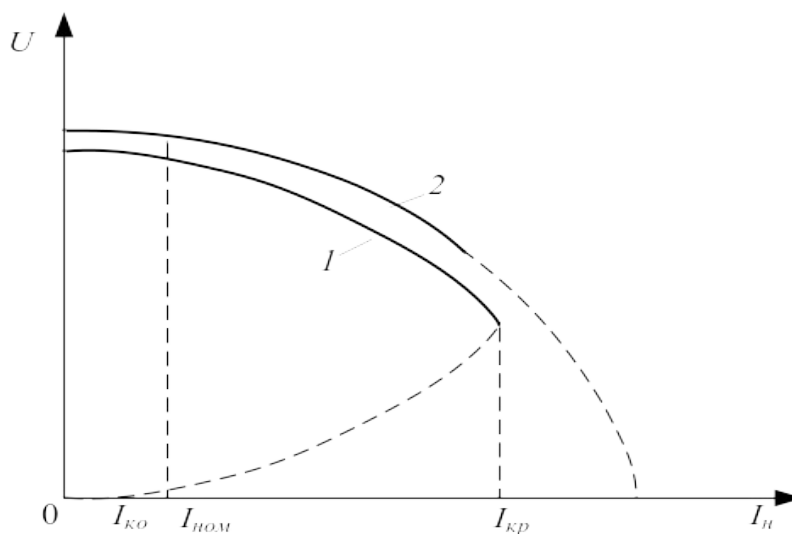


Рис. 3.8. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

При значении тока возбуждения, соответствующего изгибу характеристики холостого хода, ток нагрузки достигает своего критического значения  $I_{кр}$  (обычно не превышающего номинального значения тока нагрузки в 2-2,5 раза). До критической точки часть внешней характеристики генератора соответствует его установившемуся режиму работы; при дальнейшем увеличении нагрузки наступает неустойчивый режим работы, в результате величина напряжения на его выходе и ток возбуждения становятся равными нулю, а величина тока якоря определяется остаточным магнитным потоком  $\Phi_0$ .

При резком увеличении нагрузки вплоть до короткого замыкания изменение магнитного потока, ввиду большой величины электромагнитной постоянной цепи возбуждения, отстает от темпа нарастания тока нагрузки. Поэтому в якоре генератора наводится та же величина ЭДС, что и до режима перегрузки. В результате ток якоря может достигнуть величины, значительно превышающей  $I_{кр}$ , и вызвать круговой огонь на коллекторе машины.

### 3.9. Генератор последовательного возбуждения

В этом типе генератора (рис. 3.3, в) токи возбуждения и нагрузки одинаковы. В этом случае характеристики холостого хода и нагрузочную снять нельзя. Внешняя характеристика (рис. 3.9) имеет вид кривой 2.

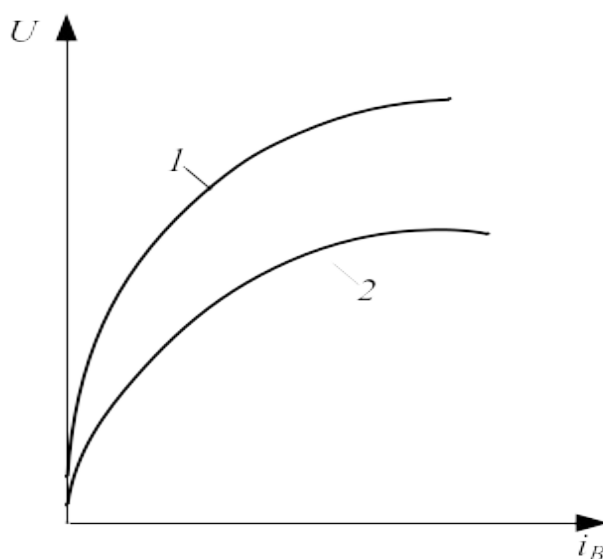


Рис. 3.9. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

Кривая 1, соответствующая режиму холостого хода, лежит выше кривой 2. При значительных перегрузках машины выходное напряжение падает, т.к. вследствие насыщения магнитопровода машины магнитный поток практически не возрастает, а поток реакции якоря становится весьма значительным.

Выходное напряжение генераторов последовательного возбуждения в значительной степени определяется величиной нагрузки, а в режиме холостого

хода оно даже становится равным нулю. Поэтому этот режим работы машины постоянного тока последовательного возбуждения используется лишь при торможении.

### 3.10. Генератор со смешанным возбуждением

В этом типе генератора (рис. 3.3, *з*) совмещаются свойства генераторов постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения. Его рассчитывают таким образом, чтобы при холостом ходе напряжение на выходе определялось параметрами параллельной обмотки ( $OB_1$ ). При работе на нагрузку падение напряжения в якоре и реакцию якоря компенсирует последовательная обмотка ( $OB_2$ ). Это позволяет в определенных пределах автоматически регулировать напряжение на нагрузке.

Характеристика холостого хода генератора ( $U_0 = f(i_{\phi})$ , при  $n = const$  и  $I_n = 0$ ) ничем не отличается от аналогичной характеристики генератора параллельного возбуждения.

Нагрузочная характеристика ( $U = f(i_{\phi})$  при  $n = const$  и  $I_n = const$ ) имеет тот же вид, что и в генераторе параллельного и независимого возбуждения (кривая 1, рис. 3.10), но она располагается, как правило, выше, т.к. за счет действия последовательной обмотки возбуждения ( $OB_2$ ) падение напряжения в цепи якоря, вызванное увеличением нагрузки, компенсируется (кривая 2, рис. 3.10).

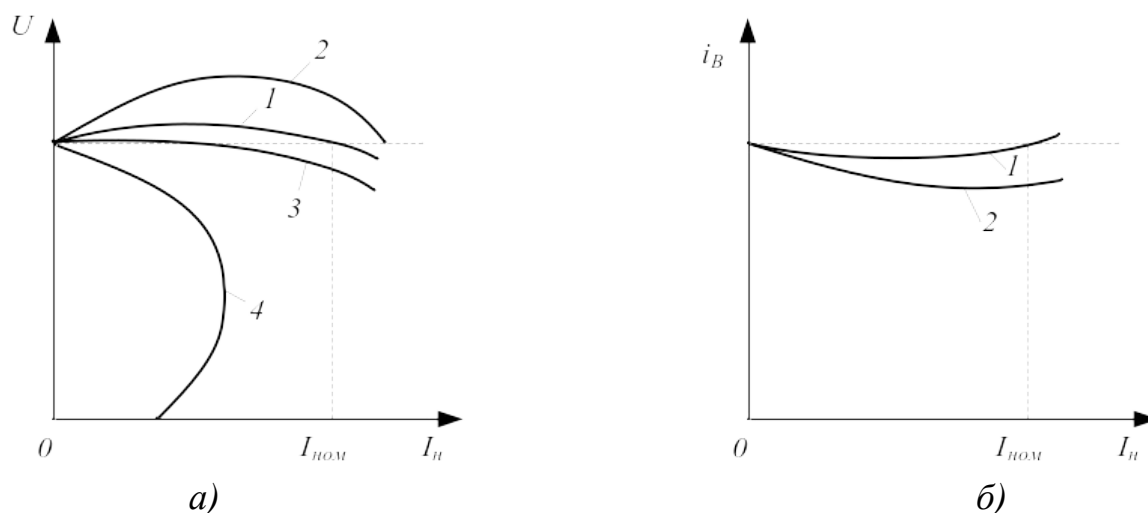


Рис. 3.10. Характеристики генератора со смешанным возбуждением:  
а) внешняя и б) регулировочная

Внешняя характеристика представляет собой зависимость  $U = f(I_n)$  при  $\eta = const$  и  $R_B = const$ . В зависимости от степени влияния последовательной обмотки возбуждения ( $OB_2$ ) можно получить четыре различных вида характеристик.

При компенсации реакции якоря и падения напряжения в якорной цепи для номинального тока нагрузки имеем характеристику вида 1 (рис. 3.10, *а*), в этом случае генератор смешанного возбуждения принято называть генератором

с нормальной последовательной обмоткой возбуждения. В случае, если необходимо компенсировать дополнительное падение напряжения в длинной линии связи нагрузки с генератором, то еще в большей степени увеличивают ампервитки последовательной обмотки возбуждения ( $OB_2$ ) и кривая внешней характеристики приобретает вид 2, а генератор смешанного возбуждения называют генератором с усиленной последовательной обмоткой возбуждения.

В некоторых случаях (в сварочных генераторах, прожекторных установках) необходимо иметь внешнюю характеристику вида 4, когда НС последовательной обмотки возбуждения направлена встречно и не компенсирует падение напряжения в якорной цепи, а, наоборот, делает внешнюю характеристику более мягкой.

Регулировочная характеристика ( $i_e = f(I_H)$  при  $n = const$  и  $U = const$ ) имеет вид кривой 1 (рис. 3.10, б) для генераторов с нормальной и 2 – для генераторов с усиленным вариантом последовательной обмотки возбуждения.

Выпускаемые в нашей стране генераторы постоянного тока имеют, как правило, параллельное возбуждение с небольшой последовательной обмоткой, обеспечивающей улучшение вида внешней характеристики. Эти генераторы могут работать также в режиме независимого возбуждения. Генераторы с параллельным возбуждением используются только при большой мощности и низкой величине генерируемого напряжения. В них независимо от величины напряжения на якоре обмотка возбуждения рассчитана на одно из стандартных напряжений 110 или 220 В, что позволяет унифицировать регулируемую аппаратуру.

### **3.11. Двигатели постоянного тока**

Классификация двигателей та же, что и генераторов. Различаются двигатели постоянного тока: независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

С независимым возбуждением выполняются мощные двигатели с целью более удобного и экономичного регулирования тока возбуждения. По своим характеристикам они ничем не отличаются от двигателей с параллельным возбуждением.

### **3.12. Энергетическая диаграмма двигателей постоянного тока**

Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока приведена на рис. 3.11.

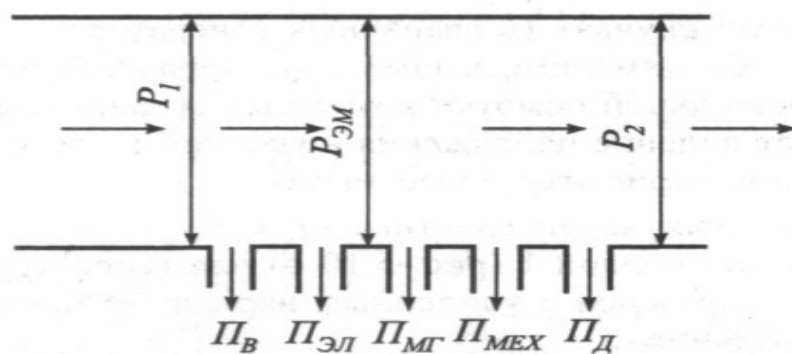


Рис. 3.11. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

Входная мощность  $P_1$ , передаваемая двигателю из электрической сети, определяется выражением:

$$P_1 = P_{\text{в}} + P_{\text{я}} = U_{\text{в}} i_{\text{в}} + U_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (3.11)$$

Часть этой мощности расходуется на покрытие потерь в обмотке возбуждения  $P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}$  и в цепи якоря  $P_{\text{эл}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}\Sigma}$ . Оставшаяся часть, равная электромагнитной мощности за вычетом магнитных потерь  $P_{\text{мг}}$ , потерь на трение в подшипниках и вентиляцию  $P_{\text{мех}}$  и дополнительных потерь, обеспечивает на валу машины постоянного тока выходную мощность  $P_2$ .

### 3.13. Механические характеристики двигателя с независимым возбуждением

На основании II закона Кирхгофа для цепей возбуждения и якоря (рис. 3.1), а также учитывая связи, выраженные зависимостями (3.1, 3.2), для установившегося режима можно записать:

$$\begin{cases} U_{\text{в}} = I_{\text{в}} R_{\text{в}}; \Phi = k I_{\text{в}}; \\ U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + c \Phi \omega; \\ M = c_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}. \end{cases} \quad (3.12)$$

Здесь  $R_{\text{я}\Sigma}$ ,  $R_{\text{в}}$  – суммарное сопротивление якорной цепи и сопротивление обмотки возбуждения.

Под механической характеристикой двигателя принято понимать зависимость его скорости вращения от момента нагрузки  $\omega = f(M)$ . Статическую механическую характеристику легко получить из второго и третьего уравнений системы (3.12):

$$\omega = \frac{U_{я}}{c_{в} \Phi} - \frac{R_{я} \sum i}{c_{в} c_{м} \Phi^2} M \quad (3.13)$$

Из уравнения (3.13) следует, что при постоянных напряжении на якоре и потоке скорость машины падает с ростом момента.

Включение в цепь якоря добавочного сопротивления, изменение потока и изменение напряжения изменяют вид механических характеристик. Механические характеристики машины с независимым (параллельным) возбуждением при различных сопротивлениях в якорной цепи показаны на рис. 3.12, а механические характеристики при различных потоках представлены на рис. 3.13, а, а при различных напряжениях на якоре – на рис. 3.13, б.

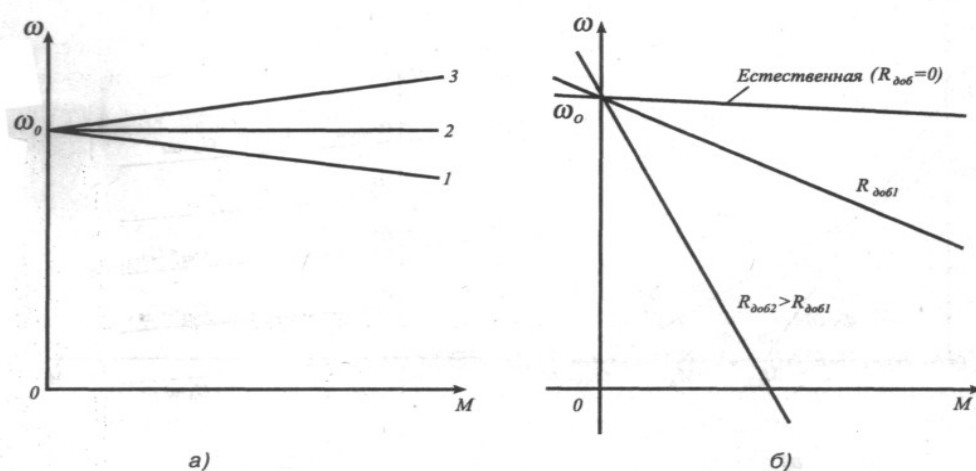


Рис. 3.12. Виды естественных механических характеристик (а) и реостатные характеристики (б) двигателя параллельного возбуждения

Вид этих характеристик определяет и область их использования при регулировании скорости вращения двигателя постоянного тока: в области скоростей, меньших номинальной, используется регулирование напряжения на якоре, а в области больших – уменьшение магнитного потока машины.

Увеличение напряжения на якоре для регулирования скорости выше номинальной обычно не используется (исключением являются некоторые типы двигателей краново-металлургических серий, в которых допускается двукратное увеличение якорного напряжения), т.к. оно приводит к значительным коммутационным осложнениям в работе механического коллектора. Увеличение магнитного потока также нецелесообразно, т.к. рабочая точка машины находится на колене кривой намагничивания машины, вблизи участка насыщения.



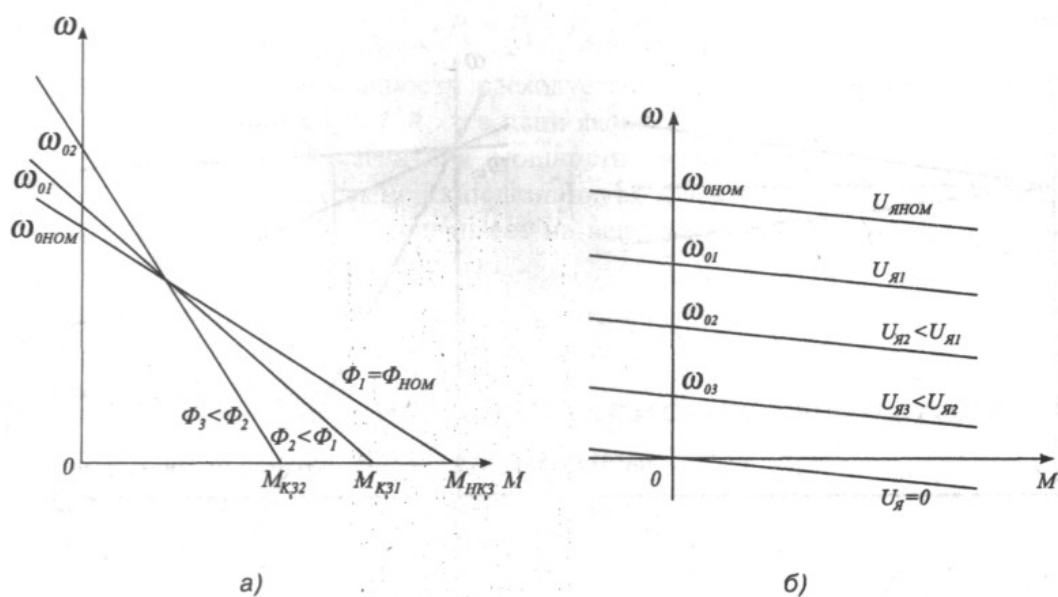


Рис. 3.13. Механические характеристики при различных потоках (а) и при различных напряжениях на якоре (б)

Регулирование скорости вращения (в сторону ее уменьшения по отношению к номинальной) увеличением сопротивления в цепи якоря в настоящее время используется крайне редко, т.к. резко ухудшает энергетические характеристики электропривода.

### 3.14. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

В двигателе с последовательным возбуждением поток и момент зависят от тока якоря. Поэтому механические характеристики машины определяются выражением

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi(I_{\text{я}})} - M(I_{\text{я}}) \frac{R_{\text{я}} \sum i}{k^2 \Phi^2(I_{\text{я}})} \quad (3.14)$$

Форма этих характеристик (рис. 3.14) при малых нагрузках имеет гиперболический характер, что говорит о необходимости исключения такого режима работы машины.

У двигателей независимого (параллельного) возбуждения  $M \sim I_{\text{я}}$ , а у двигателей последовательного возбуждения приблизительно  $M \sim I_{\text{я}}^2$ . Поэтому двигатели последовательного возбуждения при пуске развивают значительно больший момент.

Следовательно, при изменении момента нагрузки в широких пределах диапазон изменения мощности у двигателей с последовательным возбуждением значительно меньше, что и обусловило их широкое использование в тяговом электроприводе.

Так как рассчитать механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, в связи с нелинейностью кривой намагничивания машины, весьма затруднительно, то в каталогах приводятся естественные характеристики  $\omega = f(I_{\text{я}})$  и  $M = f(I_{\text{я}})$ .

Вид статических характеристик двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при различной величине сопротивления в цепи якоря и величины питающего напряжения показаны на рис. 3.14 а, б.

Из этих характеристик видно, что с уменьшением питающего напряжения уменьшается и скорость, жесткость же механических характеристик практически не меняется. Характеристика при  $U_{\text{я}} = 0$  соответствует режиму динамического торможения двигателя при замкнутой накоротко якорной цепи. Очевидно, что тормозной момент в этом случае возможен лишь при самовозбуждении машины.

Существуют два условия самовозбуждения:

- 1) направление вращения машины в режиме торможения должно быть противоположно направлению в режиме двигателя. Поэтому для обеспечения режима торможения необходимо поменять полярность выводов обмоток либо якоря, либо возбуждения;
- 2) самовозбуждение возникает лишь при определенной скорости вращения якоря машины. При увеличении сопротивления в цепи якоря величина критической скорости (т.е. минимальной скорости, при которой еще возможно самовозбуждение) также возрастает.

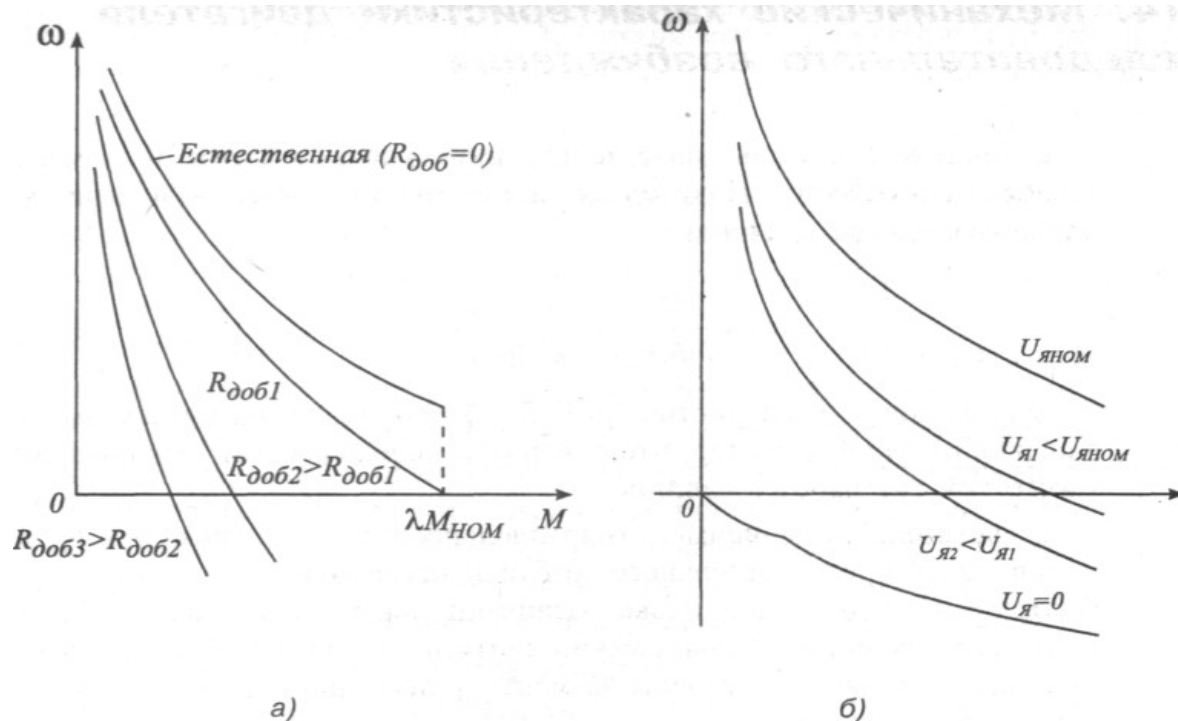


Рис. 3.14. Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при различной величине сопротивления в цепи якоря (а) и величины питающего напряжения (б)

### **3.15. Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения**

Эти двигатели используются в тех случаях, когда по условиям протекания технологического процесса необходима механическая характеристика, имеющая форму, среднюю между жесткой – двигателя независимого (параллельного) возбуждения и мягкой – двигателя последовательного возбуждения. Обычно одна из обмоток является основной и дает 70% НС машины, а другая – дополнительной. Если основной является параллельная обмотка, то машину называют параллельно-последовательной, в противном случае – последовательно-параллельной. Различают согласное и встречное включение обмоток. При согласном включении характеристика машины занимает промежуточное положение, но ближе к характеристикам параллельного возбуждения.

В некоторых случаях необходимо иметь достаточно стабильную скорость вращения машины. Это можно обеспечить, используя встречное включение обмоток так, чтобы ее действие, совместное с реакцией якоря уравновесило падение напряжения в цепи якоря. Следует иметь в виду, что в этом случае работа двигателя может быть неустойчивой.

Достоинством двигателя смешанного возбуждения является ограничение, по сравнению с двигателем последовательного возбуждения, скорости холостого хода машины, т.к. в этом случае она (теоретически и практически) имеет конечное значение.

Для обеспечения лучших условий торможения при переходе в генераторный режим работы последовательная обмотка отключается. При этом механическая характеристика становится линейной со значительной жесткостью.

### **3.16. Рабочие характеристики двигателей постоянного тока**

Рабочие характеристики двигателя постоянного тока представляют собой зависимости момента, скорости вращения, тока якоря и коэффициента полезного действия от выходной мощности двигателя. Качественный вид этих характеристик для двигателей с параллельным (независимым) и последовательным возбуждением представлен на рис. 3.15 а, б.

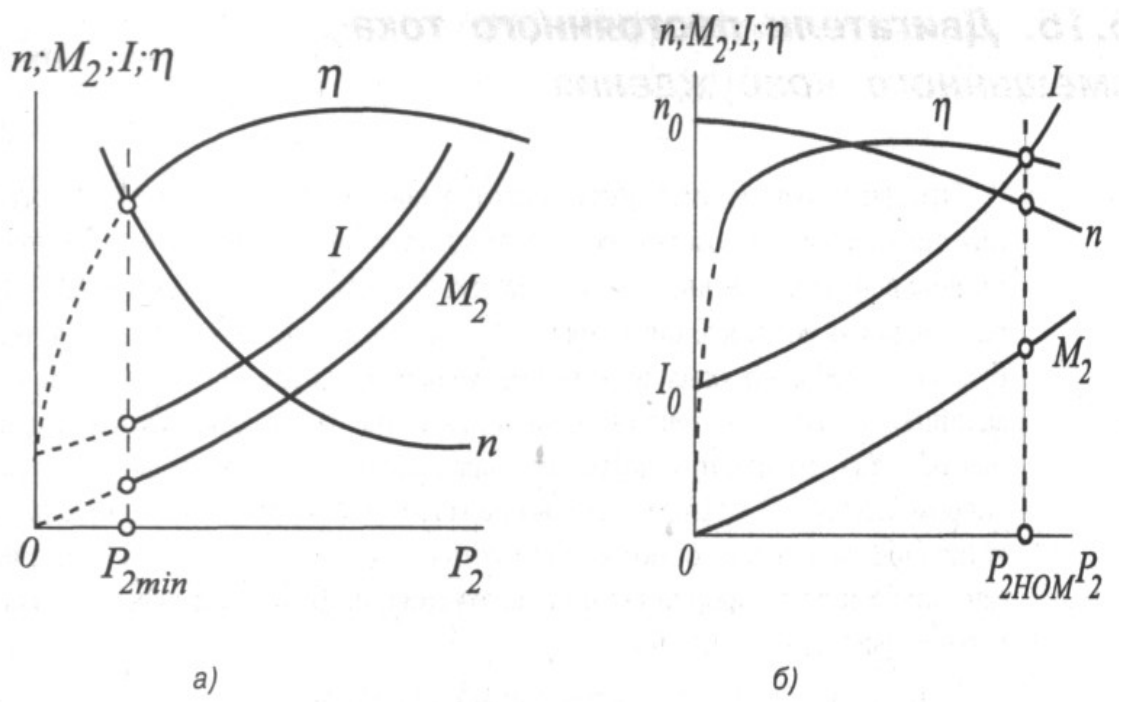


Рис. 3.15. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока с независимым параллельным (а) и последовательным (б) возбуждениями

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров С.В. Электроника : учебник для СПО / Федоров С.В., Бондарев А.В.. — Саратов : Профобразование, 2020. — 217 с. — ISBN 978-5-4488-0717-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/92209.html> (дата обращения: 01.09.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Безопасность жизнедеятельности. Часть 4. Производственное освещение : курс лекций / А.А. Дик [и др.]. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. — 80 с. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/64072.html> (дата обращения: 30.08.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
3. Естественное и искусственное освещение. СНиП 23-05-95 разработаны в соответствии с общей системой нормативных документов в строительстве и входит в состав комплекса 23 (приложение Б СНиП 10-01-94) / . — Москва : Издательский дом ЭНЕРГИЯ, 2013. — 68 с. — ISBN 978-5-98908-128-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/22678.html> (дата обращения: 30.08.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
4. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения / Б. Ю. Семенов. — 2-е изд. — Саратов : Профобразование, 2019. — 415 с. — ISBN 978-5-4488-0057-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/88008.html> (дата обращения: 01.09.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
5. Джеймс, Рег Промышленная электроника / Рег Джеймс. — 2-е изд. — Саратов : Профобразование, 2019. — 1136 с. — ISBN 978-5-4488-0058-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/88007.html> (дата обращения: 01.09.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
6. Шевченко А.Ф. Электрические машины с постоянными магнитами : учебное пособие / Шевченко А.Ф., Приступ А.Г.. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2016. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-2862-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/91588.html> (дата обращения: 30.08.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
7. Мещеряков В.Н. Электрический привод. Часть 1. Электромеханические системы : учебное пособие / Мещеряков В.Н.. — Липецк : Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2014. — 123 с. — ISBN 978-5-88247-667-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/55669.html> (дата обращения: 30.08.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользо-

вателей

8. Мещеряков В.Н. Электрический привод. Электрический привод постоянного тока. Часть 2 : учебное пособие / Мещеряков В.Н.. — Липецк : Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2016. — 61 с. — ISBN 978-5-88247-809-3. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/73095.html> (дата обращения: 30.08.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

9. Трухачев В.И. Светодиодное освещение в промышленном птицеводстве : монография / Трухачев В.И., Зонов М.Ф., Самойленко В.В.. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2012. — 108 с. — ISBN 978-5-9596-0796-8. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/47347.html> (дата обращения: 30.08.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

10. Суханова, Н. В. Электроника и схемотехника : лабораторный практикум. Учебное пособие / Н. В. Суханова. — Воронеж : Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. — 91 с. — ISBN 978-5-00032-394-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/88447.html> (дата обращения: 01.09.2024). — Режим 4