



**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Физика и электротехника»**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальностей**

**1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,  
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2020**

УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73  
Э45

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 9 от 28.05.2019 г.)*

Составители: *А. В. Козлов, К. М. Медведев*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *В. В. Брель*

Э45 **Электрические** машины : учеб.-метод. пособие по одной дисциплине для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / сост.: А. В. Козлов, К. М. Медведев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 215 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Учебно-методическое пособие содержит основные теоретические сведения по четырем разделам курса «Электрические машины» – трансформаторы, асинхронные машины, машины постоянного тока и синхронные машины. Теоретический материал содержит графические иллюстрации, поясняющие основные теоретические положения по представленным разделам курса.

Для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.313(075.8)  
ББК 31.261я73**

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Современный человек не может существовать без потребления энергии, имеющейся в природе. Уровень благосостояния человеческого общества в первую очередь определяется количеством потребляемой энергии на одного человека. Из всех видов энергии наиболее распространенной и удобной является электрическая энергия. Это объясняется ее преимуществами перед другими видами энергии. Основное преимущество состоит в том, что электрическая энергия наиболее универсальна. Она просто и практически мгновенно передается на большие расстояния, легко распределяется между потребителями и преобразуется в другие виды энергии. Поэтому электрическая энергия является наиболее удобным видом энергии. Электрические машины, называемые генераторами, служат для выработки электрической энергии. Трансформаторы служат для преобразования электрической энергии при передаче и распределении. Электрические двигатели преобразуют эту энергию в механическую работу на транспорте, в промышленности и быту.

**Цели и задачи изучения дисциплины** – получение фундаментальных теоретических и практических знаний принципов работы, конструкции, основных свойств и применения в электроэнергетике основных типов электрических машин.

**После изучения дисциплины студент должен знать:** принципы работы, устройство и основные элементы конструкции электрических машин, теорию, объясняющую их основные свойства, методы расчета их характеристик и параметров, методы экспериментального исследования основных типов электрических машин.

Для успешного изучения дисциплины «Электрические машины» необходимо регулярно самостоятельно работать над закреплением и углублением знаний. Основные знания, несомненно, дают книги. Предлагаемое учебно-методическое пособие, в этом смысле, является кратким конспектом лекций по данной дисциплине. Систематическая работа с разделами данного пособия поможет успешно сдать экзамен.

Электрическую энергию получают в результате преобразования других видов энергии. Электрическая энергия может быть преобразована обратно в механическую энергию. Основные электромеханические преобразователи энергии называются электрическими машинами.

Для производства электрической энергии служат электрические машины – генераторы. Практически вся электрическая энергия вырабатывается электрическими генераторами, которые устанавливаются на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях.

Различают турбогенераторы и гидрогенераторы. На тепловых и атомных электростанциях в качестве механического двигателя применяют-

ся паровая турбина. Генератор, который приводится во вращение паровой турбиной, называется турбогенератором. На гидроэлектростанциях в качестве механического двигателя применяется гидравлическая турбина. Генератор, который приводится во вращение гидравлической турбиной, называется гидрогенератором.

В зависимости от того, какой ток генерируют или потребляют электрические машины, они называются электрическими машинами переменного или постоянного тока. В свою очередь машины переменного тока подразделяются на синхронные и асинхронные машины. Генераторами электрической энергии являются в основном синхронные машины. Широко применяются и синхронные двигатели. Асинхронные машины, как правило, используются в режиме двигателя.

Выработанная на электростанциях энергия передается в районы потребления по линиям электропередачи. В настоящее время передача электроэнергии осуществляется, как правило, переменным током высокого напряжения (110, 220, 500, 750 и 1150 кВ). Потребляется электроэнергия при более низких напряжениях (6000; 3000; 500; 380; 220 В). Вырабатывается электроэнергия при напряжении  $U < 110$  кВ.

Для преобразования переменного тока из одного напряжения в другое служат трансформаторы. При прохождении тока от электростанции до потребителя ток трансформируется 8–9 раз.

Электрическая энергия может превращаться в различные виды энергии: механическую, тепловую, световую, звуковую, химическую и другие виды энергии. Для превращения электрической энергии в механическую энергию служат электрические двигатели. В промышленных районах в механическую энергию превращается до 75% всей электроэнергии. Во всех отраслях народного хозяйства находят массовое применение различные электрические двигатели. Они широко применяются в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, в быту.

Электрические машины широко используются в качестве преобразователей электрической энергии из одного вида в другой, а также в качестве различных датчиков, тахогенераторов, исполнительных элементов систем автоматики.

Предметом изучения данного курса являются электрические машины. Они служат: для преобразования механической энергии в электрическую энергию – электрические генераторы; для преобразования электрической энергии в механическую – электрические двигатели; для преобразования электрической энергии из одного вида в другой – электромашинные преобразователи.

Наиболее широкое применение получили генераторы и двигатели. Однако деление электрических машин на генераторы и двигатели не является принципиальным, так как электрические машины обратимы, т.е. мо-

гут работать как генератором, так и двигателем. Тем не менее электрические машины при выпуске их с завода снабжаются паспортом, в котором указывается режим работы, т.е. указывается генератор это или двигатель. Объясняется это тем, что в процессе эксплуатации к генераторам и двигателям предъявляются различные требования.

В курсе «Электрические машины» изучаются также трансформаторы. Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, который служит для преобразования переменного тока из одного напряжения в другое при неизменной частоте. Следовательно, трансформатор не является машиной (не имеет движущихся частей), однако его теория изучается вместе с теорией электрических машин. Делается это потому, что основные физические процессы и основные уравнения, описывающие работу трансформатора, такие же, что и в электрических машинах.

Электрические машины можно также разделить на три класса:

- индуктивные электрические машины – электромеханическое преобразование энергии в них осуществляется посредством магнитного поля;
- емкостные электрические машины – электромеханическое преобразование энергии в них осуществляется электрическим полем;
- индуктивно-емкостные электрические машины.

Несмотря на то, что емкостные электрические машины появились раньше индуктивных машин, они не нашли широкого промышленного применения. Объясняется это тем, что при достигнутых интенсивностях магнитного и электрических полей, количество энергии в единице объема при магнитном поле в тысячи раз больше, чем при электрическом поле. Поэтому в данном курсе рассматриваются только индуктивные электрические машины.

Материалы, из которых изготавливаются электрические машины, подразделяются на две группы: конструктивные и электротехнические. Электротехнические материалы состоят из двух видов: активные (магнитные и проводниковые) и изоляционные.

Для получения сильных магнитных полей в электрических машинах и трансформаторах применяются сердечники (магнитопроводы), выполненные из ферромагнитных материалов. При переменных магнитных полях сердечники, с целью ослабления вихревых токов, изготавливаются из листовой электротехнической стали. Другими частями электрических машин и трансформаторов являются обмотки, по которым протекают электрические токи. Для изготовления обмотки используется медь, реже алюминий. Обмотки тщательно изолируются между собой и от других элементов электрической машины.

Конструктивные материалы применяются для изготовления таких частей и деталей электрической машины, главным назначением которых является восприятие и передача механических нагрузок (валы, корпуса,

подшипниковые опоры, крепежные детали). В качестве конструктивных материалов в электрических машинах используется сталь, чугун, цветные металлы, пластмассы.

Полезная мощность, на которую рассчитана и выпускается на заводе электрическая машина и трансформатор называется номинальной. Основные номинальные величины указываются в паспортной табличке, прикрепленной к корпусу машины. Принято, что для двигателя номинальной мощностью является полезная мощность на валу, для генератора – электрическая мощность, отдаваемая с его выходных зажимов.

Номинальные величины, методы испытаний электрических машин, а также другие технико-экономические данные регламентируются стандартами на электрические машины. Номинальные напряжения электрических машин согласованы со стандартными напряжениями электрических сетей.

# 1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1 Устройство и принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации напряжений

Однофазный трансформатор содержит катушки с намотанными на них обмотками, которые посажены на замкнутый сердечник (магнитопровод) из электротехнической стали. Катушки называются первичной и вторичной обмотками, которые имеют, соответственно,  $w_1$  и  $w_2$  число витков (рис. 1.1). Первичная обмотка одна, а вторичных обмоток может быть больше одной. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения в сеть с напряжением  $U_1$ . С вторичной обмотки снимается переменное напряжение  $U_2$ . Трансформатор может работать как в режиме холостого хода, когда вторичная обмотка разомкнута (рис. 1.1, а), так и под нагрузкой, когда к вторичной обмотке подключено сопротивление нагрузки (нагрузка)  $Z_n$  (рис. 1.1, б).

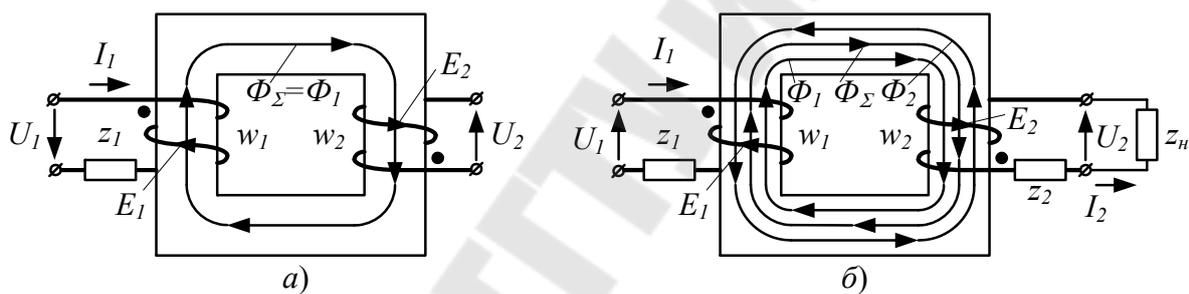


Рисунок 1.1 - Устройство и принцип действия однофазного трансформатора: холостой ход (а) и работа по нагрузкой (б)

При работе трансформатора на холостом ходу (рис.1.1,а) первичная обмотка  $w_1$  подключена к сети с напряжением  $U_1$  и так как из сети и обмотки образована замкнутая цепь, то по обмотке потечет переменный ток  $I_1$ . Переменный ток  $I_1$  создаст в катушке переменное магнитное поле  $\Phi_1$ , которое практически полностью будет сосредоточено в магнитопроводе. На магнитопроводе помещена вторичная обмотка  $w_2$  и переменное магнитное поле  $\Phi_1$  пересекает контуры (витки) вторичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая сила  $E_2$ . Концы вторичной обмотки выведены наружу трансформатора и на этих выводах будет присутствовать напряжение  $U_2$ , которое в точности будет равно ЭДС  $E_2$  (так как вторичная обмотка разомкнута). Таким образом, в трансформаторе произошло преобразование переменных напряжений:  $U_1$  преобразовалось в напряжение  $U_2$ .

Одновременно переменное магнитное поле  $\Phi_1$  пересекает контуры (витки) первичной обмотки и, поэтому в ней наведется электродвижущая

сила  $E_1$ . Так как общий (суммарный) магнитный поток  $\Phi_\Sigma$  одинаков для витков обоих обмоток и, поэтому, в каждом витке обмоток индуцируется одинаковая по величине ЭДС, которую обозначим как  $E_{\text{вит}}$ . ЭДС обмоток будут прямо пропорциональны числам их витков  $w_1$  и  $w_2$ :

$$E_1 = E_{\text{вит}} w_1, \quad E_2 = E_{\text{вит}} w_2. \quad (1.1)$$

Из (1.1) следует, что отношение ЭДС обмоток равно отношению их числа витков:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_{\text{вит}} w_1}{E_{\text{вит}} w_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.2)$$

Коэффициентом трансформации  $k_{mp}$  называют следующее отношение напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на обмотках:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.3)$$

Ввиду реальной (подтвержденной опытным путем) малости падения напряжения на внутреннем сопротивлении  $z_1$  первичной обмотки, ЭДС  $E_1$  будет практически равной напряжению  $U_1$ :

$$E_1 \approx U_1.$$

Для вторичной обмотки, тока в которой нет, напряжение  $U_2$  будет точно равным ЭДС  $E_2$ :

$$U_2 = E_2.$$

Формула коэффициента трансформации с учетом (1.3) и (1.2) примет вид:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.4)$$

Из последней формулы следует, что коэффициент трансформации  $k_{mp}$  можно рассчитывать как конструктивную характеристику трансформатора (без подключения трансформатора к сети), что является удобным.

Если  $U_2 > U_1$ , то трансформатор называют повышающим и его  $k_{mp} < 1$ . Если  $U_2 < U_1$ , то трансформатор называют понижающим и его  $k_{mp} > 1$ .

## Вопросы и задания

1. Поясните устройство трансформатора, назначение катушек и магнитопровода.
2. Объясните принцип действия трансформатора.
3. Почему в первичной обмотке, подключенной к сети, возникает ЭДС  $E_1$ ? В каком соотношении находится ЭДС  $E_1$  с напряжением сети  $U_1$ ?
4. Что такое коэффициент трансформации  $k_{mp}$  и какие варианты расчета его существуют?

### 1.2 Работа однофазного трансформатора под нагрузкой. Трансформация токов

К выводам вторичной обмотки подключается нагрузка  $z_n$  (рис. 1.1, б). В подключенной к сети первичной обмотке протекает переменный ток  $I_1$ , который создаст в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi_1$ . Переменный магнитный поток  $\Phi_1$  будет пересекать витки вторичной обмотки и, поэтому, в ней наведется переменная ЭДС  $E_2$ . Так как вторичная обмотка вместе с сопротивлением  $z_n$  образуют замкнутый контур, то в контуре и в самой вторичной обмотке потечет переменный ток  $I_2$ . Переменный ток  $I_2$  создаст во вторичной катушке и в магнитопроводе переменное магнитное поле  $\Phi_2$ . Если напряжение  $U_1$  синусоидально, то синусоидальны созданный им ток  $I_1$ , синусоидально поле  $\Phi_1$ , синусоидальны ЭДС  $E_2$  и ток  $I_2$  и, наконец, синусоидально поле  $\Phi_2$ . Определенное по правилу Ленца магнитное поле  $\Phi_2$  будет находиться в противофазе с полем  $\Phi_1$ . Этот факт на рис. 1.1, б отражен тем, что потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  направлены в магнитопроводе встречно.

Два встречных магнитных потока создадут одно суммарное поле:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (1.5)$$

Суммарное поле  $\Phi_{\Sigma}$  наводит в обеих обмотках ЭДС.  $E_1$  и  $E_2$ . При реальных малых внутренних сопротивлениях  $z_1$  и  $z_2$  обмоток трансформатора различия между ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  и соответствующими напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  незначительны (2..3%) независимо от степени загрузки трансформатора. Поэтому, при постоянном действующем значении сетевого напряжения  $U_1$  действующее значение ЭДС  $E_1$  также будет постоянным. Если ЭДС  $E_1$  создается переменным магнитным полем  $\Phi_{\Sigma}$ , то при постоянстве действующего значения ЭДС  $E_1$ , также будет постоянна амплитуда магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$ . Это явление, наблюдающееся в трансформаторе, называется принципом постоянства магнитного поля в сердечнике трансформатора.

Так как  $\Phi_{\Sigma}$  связан с потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  соотношением (1.5), то при возрастании тока  $I_2$  вторичной обмотки и создаваемого им магнитного потока  $\Phi_2$  должен увеличиться магнитный поток  $\Phi_1$ . Это возможно только одним путем – увеличением потребляемого из сети тока  $I_1$ . Значит,  $I_1$  отслеживает изменения тока  $I_2$ : если  $I_2$  изменится, вслед за ним пропорционально изменится ток  $I_1$ . Описанное явление называется трансформацией токов в трансформаторе. Числовой характеристикой взаимозависимости токов является коэффициент трансформации токов:

$$k_{mp.I} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (1.6)$$

Числовое значение коэффициента трансформации токов для нагруженного трансформатора практически совпадает с базовым определением коэффициента трансформации через напряжения обмоток (1.3):  $k_{mp.I} \cong k_{mp}$ . Приравняв два (1.3) и (1.6) определения коэффициента трансформации (через токи и напряжения обмоток), получим:

$$k_{mp.I} \cong k_{mp} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow U_2 I_2 \cong U_1 I_1. \quad (1.7)$$

Из последнего равенства цепи (1.7) следует вывод: полные мощности первичной и вторичной обмоток практически одинаковы. Это значит, что в трансформаторе не происходит преобразования мощности, а преобразуются только напряжения и токи.

### Вопросы и задания

1. Как создается суммарный магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$ ?
2. Объясните принцип постоянства суммарного магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$ .
3. Что такое коэффициент трансформации токов?
4. Объясните принцип постоянства полной мощности трансформатора.

### 1.3 Индуктивное сопротивление рассеяния. Приведенный однофазный трансформатор. Пересчет параметров вторичной обмотки трансформатора

#### *Определение индуктивного сопротивления рассеяния*

На рис. 1.2 приведен чертеж картины магнитных полей обмотки трансформатора.

Ток  $I$  в обмотке трансформатора создает магнитное поле  $\Phi$ , направление которого определяется правилом буравчика. Поле представляет собой замкнутые линии, которые окружают проводник витка с током и которые вложены друг в друга.

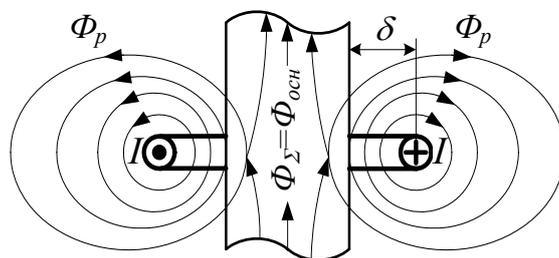


Рисунок 1.2 - Картина магнитных полей витка обмотки трансформатора

Между обмоткой и сердечником существует технологический зазор  $\delta$ , образованный толщиной стенок каркаса катушки, многослойно намоткой обмотки с применением изоляционных прокладок между слоями. Те линии магнитного поля, которые не достигли тела магнитопровода, образуют поля рассеяния  $\Phi_p$ . Более удаленные линии магнитного поля проникают в магнитопровод и создают в нем основное магнитное поле  $\Phi_{осн}$ . Благодаря полю  $\Phi_{осн}$  осуществляется трансформация напряжений между посаженными на сердечник обмотками, что определяет использование трансформатора по назначению. Поля  $\Phi_p$ , находящиеся вне сердечника, в трансформации напряжений не участвуют и, поэтому их называют полями рассеяния.

Поля  $\Phi_p$ , как созданные током  $I$  в катушке, прямо пропорциональны току:

$$\Phi_p \sim I. \quad (1.8)$$

В то же время поля  $\Phi_p$  являются переменными, так как ток  $I$  в катушке переменный. Переменное магнитное поле  $\Phi_p$  индуцирует в катушке ЭДС рассеяния  $E_p$ , которая прямо пропорциональна ему:

$$E_p \sim \Phi_p. \quad (1.9)$$

Из пропорций (1.8) и (1.9) следует, что между ЭДС  $E_p$  и током  $\Phi_p \sim I$  также существует прямая пропорция:

$$E_p \sim I. \quad (1.10)$$

Известно, что законом Ома устанавливается пропорция между напряжением цепи и током в ней и коэффициентом пропорциональности является сопротивление. Применим формально к выражению (1.10) закон Ома:

$$E_p = x_p I, \quad (1.11)$$

где  $x_p$  называют индуктивным сопротивлением рассеяния.

Теперь используем следующие факты относительно переменных  $E_p$ ,  $\Phi_p$  и  $I$ .

Ток  $I$  и магнитный поток  $\Phi_p$  синфазны, а ЭДС  $E_p$  отстает по фазе от потока  $\Phi_p$  на угол  $90^\circ$ . Следовательно, ЭДС  $E_p$  отстает от тока  $I$  на угол  $90^\circ$ . В комплексных переменных отстающему на угол  $90^\circ$  сигналу соответствует символ  $-j$ . С учетом указанного фазового сдвига между  $E_p$  и  $I$  выражение (1.11) может быть заменено на векторное выражение:

$$\dot{E}_p = -jx_p \dot{I} \quad (1.12)$$

### ***Приведенный однофазный трансформатор***

Процедура приведения трансформатора заключается его в замене электрической схемы, содержащей две индуктивно связанные катушки, на схему с непосредственным соединением первичной и вторичной обмоток. Расчет последней схемы будет проще, так как в ней не будет индуктивной связи. Процедура приведения поясняется серией рисунков (рис. 1.3).

На рис. 1.3, *а* приведена исходная схема физического трансформатора. Затем каждая из обмоток представляется (рис. 1.3, *б*) в виде источника ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , индуктивного сопротивления рассеяния  $x_{p1}$  и  $x_{p2}$  и активных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  проводников обмоток. В последней схеме  $E_1$  и  $E_2$  не равны друг другу, так у обмоток неодинаковые числа витков  $w_1$  и  $w_2$ .

Изменяем число витков  $w_2$  вторичной обмотки так, чтобы оно стало равным числу витков  $w_1$  первичной обмотки (рис. 1.3, *в*). В результате ЭДС  $E_2$  станет равной ЭДС  $E_1$ . Изменившуюся ЭДС  $E_2$  обозначим как  $E'_2$ . Также обозначения сопротивлений  $x_{p1}$  и  $R_2$  изменим на  $x'_{p2}$  и  $R'_2$ . Так как стало  $E_1 = E'_2$ , то между обмотками  $w_1$  и  $w'_2$  можно установить перемычки (рис. 1.3, *г*), в которых не будет тока, а просто будет механическое объединение физической первичной и приведенной вторичной обмоток. При таком соединении можно считать указанные обмотки одной обмоткой, и считать ее как одной катушкой с сердечником. Такая катушка представляется в виде последовательно соединенных сопротивлений  $x_0$  и  $R_0$  с тем их физическим смыслом, что сопротивлением  $x_0$  учитывается наличие в ка-

тушке основного магнитного поля  $\Phi_{осн}$ , а сопротивлением  $R_0$  учитываются потери мощности в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи. Схема приведенного трансформатора примет окончательный вид (рис.1.3,д). Схема называется полной схемой замещения трансформатора. Между обмотками приведенного трансформатора больше нет магнитной связи.

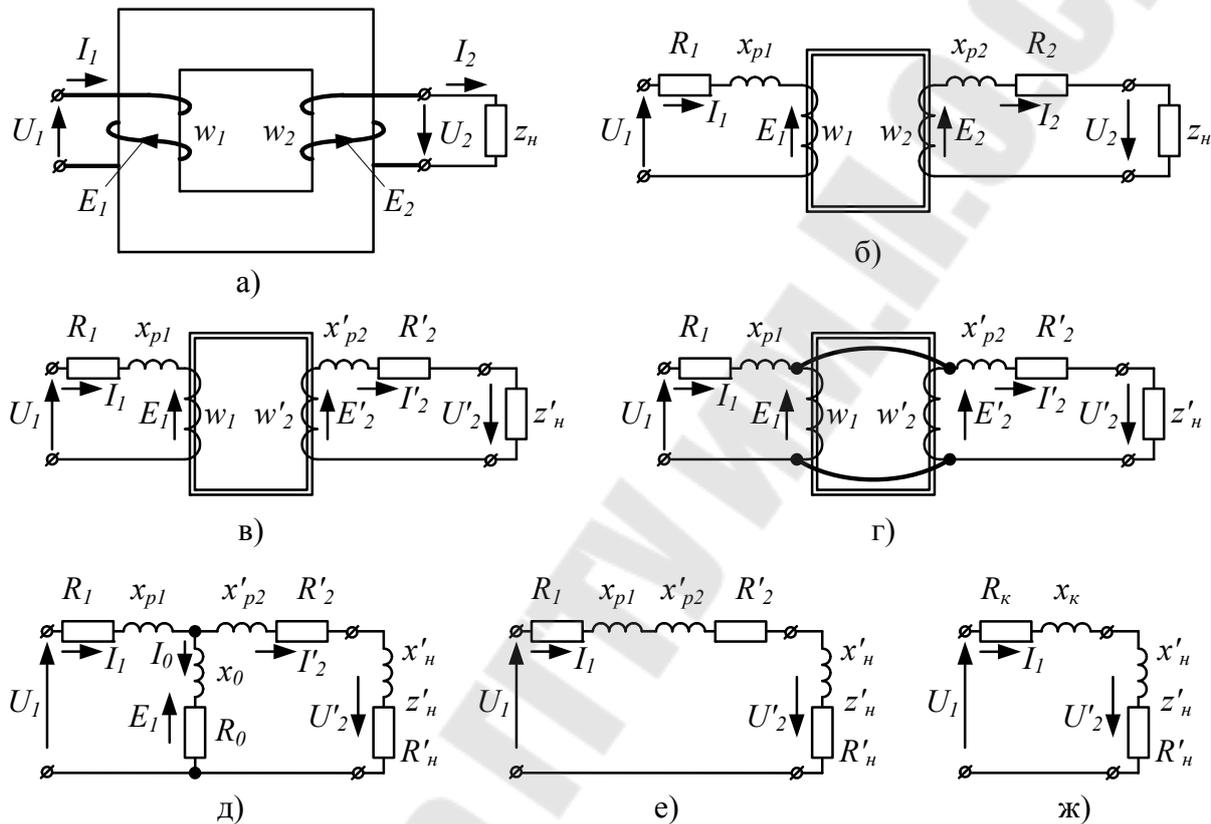


Рисунок 1.3 - Процедуры приведения однофазного трансформатора (а, б, в, г) и его схемы замещения (д, е, ж)

При работе трансформатора под нагрузкой близкой к номинальной ток  $I_0$  намного меньше двух других токов  $I_1$  и  $I'_2$ , и, поэтому, можно цепью намагничивания  $x_0$  и  $R_0$  можно пренебречь. В результате получаем упрощенную схему замещения трансформатора (рис. 1.3, е). Объединением сопротивлений  $x_{p1}$  с  $x'_{p2}$  и  $R_2$  с  $R'_2$  получим простейшую схему замещения (рис. 1.3, ж), в которой  $x_k = x_{p1} + x'_{p2}$  и  $R_k = R_1 + R'_2$  называют, соответственно, индуктивным и активным сопротивлениями короткого замыкания трансформатора.

### Пересчет параметров вторичной обмотки

У приведенной вторичной обмотки для ее параметры и сигналов применены обозначения  $U'_2, I'_2, x'_{p2}, R'_2$ . Сопротивления нагрузки тоже должны быть обозначены как приведенные:  $z'_n, x'_n, R'_n$ . У исходного трансформатора перечисленные величины являются физическими и имеют обозначения  $U_2, I_2, x_{p2}, R_2, Z_n, x_n$  и  $R_n$ . Для того, чтобы можно было в расчетах электрических схем с трансформатором использовать его схему замещения, необходим пересчет физических величин (без штриха) в приведенные (со штрихом). Формулы пересчета имеют вид:

$$\begin{aligned} U'_2 &= k_{mp} U_2, & I'_2 &= \frac{I_2}{k_{mp}}, & x'_{p2} &= k_{mp}^2 x_{p2}, & R'_2 &= k_{mp}^2 R_2, \\ z'_n &= k_{mp}^2 z_n, & x'_n &= k_{mp}^2 x_n, & R'_n &= k_{mp}^2 R_n. \end{aligned} \quad (1.13)$$

При выводе формул использовались равенство активных, реактивных и полных мощностей на всех одноименных элементах исходной схемы трансформатора и его схемы замещения.

Расчеты, например, напряжения  $U_2$  и тока  $I_2$  в нагрузке с использованием полной схемы замещения трансформатора выполняются по следующему алгоритму:

1. По формулам с 3-й по 7-ю системы (1.13) переводятся все физические сопротивления в приведенные. Сопротивления первичной обмотки  $x_{p1}$  и  $R_1$  и цепи намагничивания  $x_0$  и  $R_0$  берутся не пересчитанными.
2. По схеме замещения (рис.1.3,д) методами теории цепей рассчитываются все токи и напряжения, в том числе и  $U'_2, I'_2$ .
3. По формулам, обратным к формулам 1 и 2 системы (1.13), рассчитывают физические напряжение  $U_2$  и ток  $I_2$ .

### Вопросы и задания

1. Поясните картину магнитного поля катушки трансформатора и смысл названий потоков основного и рассеяния.
2. Как выводится индуктивное сопротивление рассеяния?
3. Поясните этапы приведения трансформатора.
4. Какие существуют схемы замещения трансформатора?
5. Какой алгоритм расчета по схеме замещения трансформатора?

## 1.4 Опыты холостого хода и короткого замыкания однофазного трансформатора

Сопротивления схемы замещения трансформатора принято определять экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания.

### Опыт холостого хода

Схема опыта приведена на рис. 1.4, а. Условия проведения опыта:

- вторичная обмотка  $w_2$  разомкнута;
- на первичную обмотку  $w_1$  подается номинальное напряжение  $U_{1ном}$ .

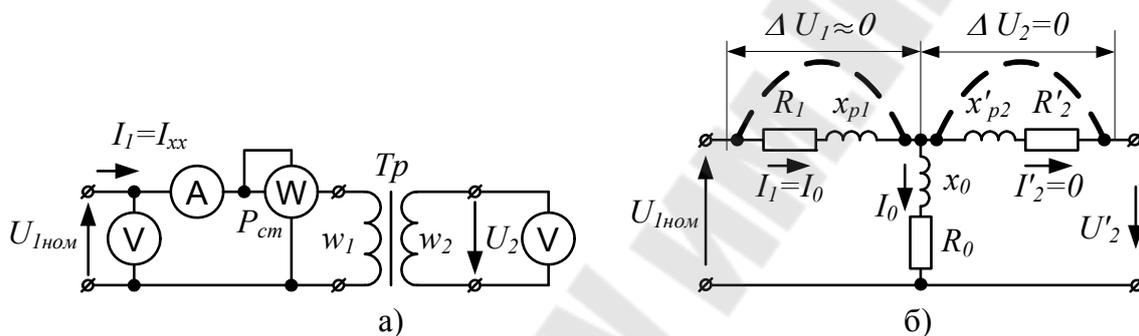


Рисунок 1.4 - Принципиальная электрическая схема (а) опыта холостого хода и схема замещения (б) трансформатора для опыта

Подключенными приборами измеряются: напряжения  $U_1$  и  $U_2$  первичной и вторичной обмоток, ток холостого хода  $I_1 = I_{xx}$  первичной обмотки и потребляемая активная мощность  $P_1$ . Так как ток во вторичной обмотке нулевой, а ток первичной обмотки  $I_{xx}$  мал, то потерями мощности в активных сопротивлениях обмоток можно пренебречь. Магнитный поток в сердечнике номинальный, так как к трансформатору приложено номинальное напряжение  $U_{1ном}$ . Измеренная активная мощность  $P_1$  является номинальной мощностью потерь в стали  $P_1 = P_{ст.ном}$ .

Схема замещения для опыта представлена на рис. 1.4, б.

Так как в разомкнутой вторичной обмотке ток нулевой, то нулевым будет падение напряжения  $\Delta U_2 = 0$  на внутреннем сопротивлении обмотки. Вследствие этого внутреннее сопротивление вторичной обмотки можно считать нулевым. У реальных трансформаторов внутренние сопротивления  $x_{p1}$  и  $R_1$  первичной обмотки намного меньше сопротивлений  $x_0$  и  $R_0$  цепи намагничивания:  $R_1 \ll R_0$  и  $x_{p1} \ll x_0$ . Поэтому внутренними сопротивлениями первичной обмотки можно пренебречь и считать их нулевыми. На схеме замещения внутренние сопротивления обеих обмоток показаны закороченными.

По измеренным значениям рассчитывают:

1) сопротивления  $R_0$  и  $x_0$  цепи намагничивания по формулам:

$$R_0 = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_0 = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2} \quad (1.14)$$

2) коэффициент трансформации

$$k_{тр} = \frac{U_1}{U_2}.$$

### Опыт короткого замыкания

Схема опыта приведена на рис. 1.5, а. Условия проведения опыта:

- вторичная обмотка  $w_2$  замкнута на амперметр с практически нулевым внутренним сопротивлением;
- на первичную обмотку  $w_1$  подается пониженное напряжение  $U_{кз}$  такой величины, при котором во вторичной обмотке протекает номинальный ток  $I_{2ном}$ .

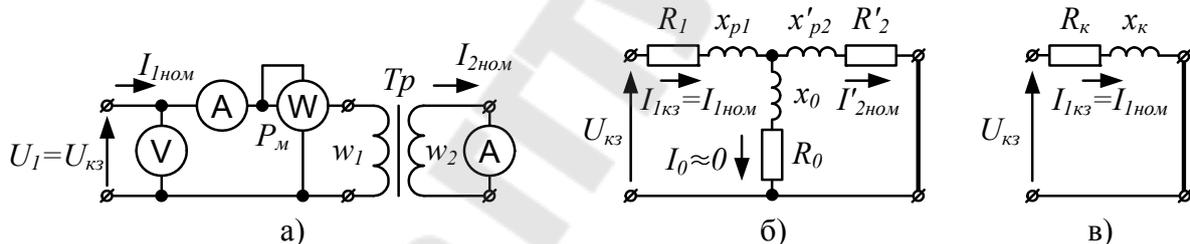


Рисунок 1.5 - Принципиальная электрическая схема (а) опыта короткого замыкания и схемы замещения (б, в) трансформатора для опыта

Подключенными приборами измеряются: напряжение  $U_1$  первичной обмотки, токи  $I_1$  и  $I_2$  первичной и вторичной обмоток и потребляемая активная мощность  $P_1$ . Напряжение короткого замыкания  $U_{кз}$  мало и составляет всего 4...7% от номинального. Магнитный поток в магнитопроводе, который пропорционален  $U_{кз}$ , также очень мал и потери мощности в стали  $P_{ст}$ , которые пропорциональны  $\Phi_{осн}^{1,6}$  и составляют  $(0,04...0,07)^{1,6} = 0,006...0,01 = 0,6...1\%$ , что является очень малой величиной. Поэтому потерями мощности в стали можно пренебречь.

При проведении опыта контролируется равенство номинальному току тока  $I_2$  вторичной обмотки. В силу свойства трансформатора трансформировать ток, номинальным будет также ток и первичной обмотки  $I_{1ном}$ .

Значит измеренные потери мощности являются номинальными потерями в меди  $P_{\text{м.ном}}$  обмоток.

В полной схеме замещения для опыта, представленной на рис. 1.5, в, цепью намагничивания можно пренебречь, так как ток  $I_0$  в ней намного меньше токов  $I_1$  и  $I_2$ . Объединив, затем, активные  $R_1, R'_2$  и реактивные сопротивления рассеяния  $x_{p1}, x'_{p2}$  обмоток в сопротивления, соответственно,  $R_k$  и  $x_k$ , получим простейшую схему замещения (рис. 1.5, в) для опыта короткого замыкания.

По измеренным значениям рассчитывают:

1) сопротивления  $R_k$  и  $x_k$  короткого замыкания по формулам:

$$R_k = \frac{P_1}{I_1^2}, \quad z_k = \frac{U_1}{I_1}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - R_k^2}; \quad (1.15)$$

2) активные  $R_1, R'_2$  и реактивные сопротивления рассеяния  $x_{p1}, x'_{p2}$  обмоток, принимаемые равными половине сопротивлений  $R_k$  и  $x_k$  короткого замыкания:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}, \quad x_{p1} = x'_{p2} = \frac{x_k}{2} \quad (1.16)$$

и физические сопротивления вторичной обмотки (см. формулы (1.13)):

$$R_2 = \frac{R'_2}{k_{mp}^2}, \quad x_{p2} = \frac{x'_{p2}}{k_{mp}^2}. \quad (1.17)$$

### Вопросы и задания

1. Назовите условия проведения опыта холостого хода и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.

2. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте холостого хода.

3. Назовите условия проведения опыта короткого замыкания и определяемые по результатам опыта параметры схемы замещения трансформатора.

4. Поясните вид схемы замещения трансформатора и смысл измеренных сигналов в опыте короткого замыкания.

## 1.5 Уравнения однофазного трансформатора. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора

Система уравнений однофазного трансформатора состоит из уравнений, которыми описывается полная схема замещения его (рис. 1.3, д), и уравнение нагрузки:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - \dot{E}_1 = (R_1 + jx_{p1})\dot{I}_1, \\ \dot{E}_1 = \dot{U}'_2 + (R'_2 + jx'_{p2})\dot{I}'_2, \\ \dot{E}_1 = (R_0 + jx_0)\dot{I}_0, \\ \dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_0, \\ \dot{U}'_2 = (R'_n + jx'_n)\dot{I}'_2. \end{cases} \quad (1.18)$$

Для нагруженного трансформатора заданными величинами являются:

- напряжение сети  $U_1$ ;
- сопротивления  $R_1, R'_2, x_{p1}, x'_{p2}, R_0, x_0$  схемы замещения трансформатора;
- сопротивления  $R_n, x_n$  нагрузки.

Этих данных достаточно для того, чтобы рассчитать напряжение  $U_2$  на нагрузке по уравнениям системы (1.18). Расчет можно выполнить как аналитически символическим методом, так и графоаналитическим методом с использованием векторной диаграммы трансформатора.

Порядок построения векторной диаграммы нагруженного трансформатора:

1. Задаемся произвольным числовым значением напряжения  $U'_2$ . Проводим горизонтально вектор напряжения  $U'_2$ , длина которого определяется через величины  $U'_2$  и предварительного масштаба  $m_{U2}$  (мм/В) выбранного для всех векторов напряжений диаграммы:

$$|\dot{U}'_2| = m_{U2}U'_2$$

Из 5-го уравнения системы (1.18) рассчитываем по закону Ома ток  $I'_2$ :

$$I'_2 = \frac{U'_2}{z'_n}, \quad \text{где} \quad z'_n = \sqrt{R_n'^2 + x_n'^2}.$$

Поводим вектор  $\dot{I}'_2$  под углом  $\varphi_n = \arctg \frac{x'_2}{R'_2}$  к вектору  $\dot{U}'_2$ . Вычисляем напряжения  $R'_n \dot{I}'_2$  и  $jx'_n \dot{I}'_2$ , и проводим суммирование в соответствии с 5-м уравнением системы (1.18) векторов  $R'_n \dot{I}'_2$  и  $jx'_n \dot{I}'_2$ . Вектор найденной суммы должен совпасть с вектором  $\dot{U}'_2$ .

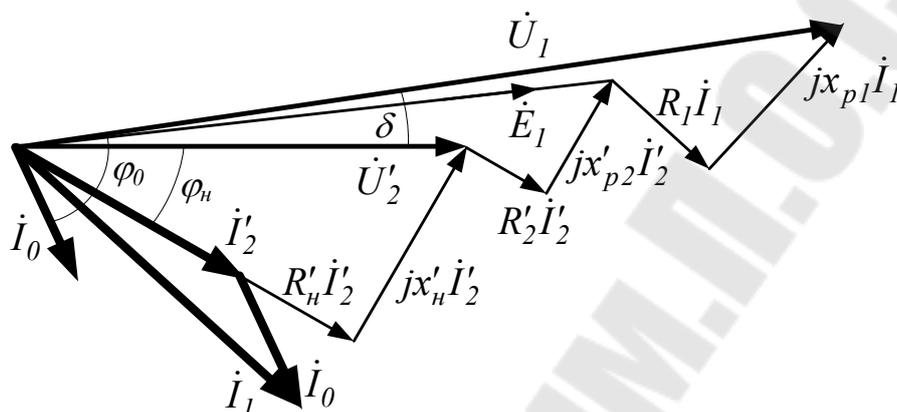


Рисунок 1.6 - Векторная диаграмма трансформатора для его полной схемы замещения

2. Вычисляем вектора напряжений  $R'_2 \dot{I}'_2$  и  $jx'_2 \dot{I}'_2$ , и проводим их суммирование в соответствии с 2-м уравнением системы (1.18). Вектор найденной суммы будет вектором  $\dot{E}'_1$ .

3. Из 3-го уравнения системы (1.18) находим параметры тока  $I_0$ :

$$I_0 = \frac{E_1}{z_0} \quad \text{и} \quad \varphi_0 = \arctg \frac{x_0}{R_0}, \quad \text{где} \quad z_0 = \sqrt{R_0^2 + x_0^2}.$$

Поводим вектор  $\dot{I}_0$  под углом  $\varphi_0$  к вектору  $\dot{E}'_1$ .

4. В соответствии с 4-м уравнением системы (1.18) находим вектор тока  $\dot{I}_1$  как сумму векторов  $\dot{I}'_2$  и  $\dot{I}_0$ .

5. Вычисляем вектора напряжений  $R_1 \dot{I}_1$  и  $x_{p1} \dot{I}_1$ , и проводим их суммирование с вектором  $\dot{E}'_1$  в соответствии с 1-м уравнением системы (1.18). Вектор найденной суммы будет вектором  $\dot{U}_1$  напряжения сети.

6. При определенной построением длине вектора  $\dot{U}_1$  и заданном числовом значении сетевого напряжения  $U_1$  вычисляем окончательный масштаб для напряжений

$$m_{U1} = \frac{|\dot{U}_1|}{U_1}$$

и истинное (в п. 1 принималось произвольное значение) напряжения  $U_2$ :

$$U_2 = \frac{|\dot{U}_2|}{m_{U1}}.$$

### Вопросы и задания

1. Составьте уравнения, описывающие нагруженный трансформатор.
2. Поясните вычисления и построения, позволяющие найти вектор.
3. Поясните вычисления и построения, позволяющие найти вектор.

### 1.6 Внешняя характеристика однофазного трансформатора. Расчет потерь напряжения

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость напряжения  $U_2$  на нагрузке от протекающего в ней тока  $I_2$  при неизменном напряжении сети  $U_1$  или, если использовать в расчетах схему замещения трансформатора, – напряжения от тока при неизменном  $U_1$ .

Трудоемкость вычислений и вид внешней характеристики существенно зависит от вида используемой в расчетах схемы замещения трансформатора. Расчеты по полной схеме замещения можно выполнить с использованием векторной диаграммы, приведенной на рис. 1.6. Однако формулы внешней характеристики будут громоздкими и сложными. При расчетах внешней характеристики для нагруженного трансформатора можно использовать простейшую схему замещения, изображенную на рис. 1.3, *ж*. Формулы внешней характеристики будут простейшими с допустимой в инженерных расчетах погрешностью  $\pm 5\%$ . Следовательно, допустимо рассматривать только вариант расчета с простейшей схемой замещения трансформатора.

Перед выводом формулы внешней характеристики учтем две особенности:

- 1) в упрощенной схеме отсутствует цепь намагничивания и, поэтому, ток  $I_0$  равен нулю, а токи  $I_1$  и  $I'_2$  совпадают и, следовательно, в расчетах можно использовать только ток  $I'_2$ ;
- 2) для реальных трансформаторов угол  $\delta$  между векторами напряжений и (рис. 1.6) мал, и его допустимо принять равным нулю.

С учетом отмеченных особенностей векторная диаграмма трансформатора, из которой выводятся формулы внешней характеристики, будет вида, приведенного на рис. 1.7.

Так как на рис. 1.7 вектора напряжений  $\dot{U}'_1$  и  $\dot{U}'_2$  параллельны, то допустимо далее вести расчеты в алгебраической форме, а не в символической.

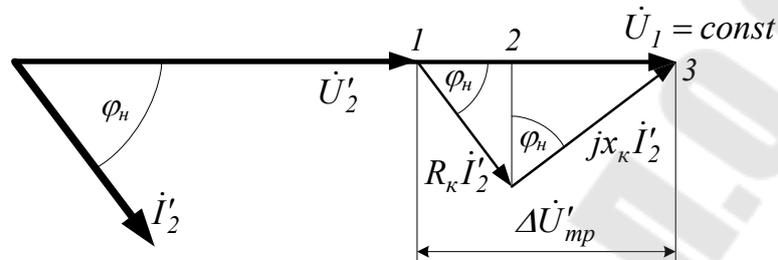


Рисунок 1.7 - Векторная диаграмма трансформатора для расчета внешней характеристики

Из векторной диаграммы следует

$$U'_2 = U_1 - \Delta U'_{mp}. \quad (1.19)$$

Падение напряжения  $\Delta U'_{mp}$  на внутреннем сопротивлении  $R_k + jx_k$  трансформатора равно длине отрезка  $\overline{1-3}$ , который является суммой отрезков  $\overline{1-2}$  и  $\overline{2-3}$ . Из диаграммы, как чертежа, следует формула потерь напряжения в нагруженном трансформаторе

$$\Delta U'_{mp} = R_k I'_2 \cos \varphi_n + x_k I'_2 \sin \varphi_n. \quad (1.20)$$

После подстановки (1.20) в (1.19) получаем внешнюю характеристику:

$$U'_2 = U_1 - (R_k \cos \varphi_n + x_k \sin \varphi_n) I'_2. \quad (1.21)$$

График внешней характеристики представляет собой прямую линию (рис. 1.8). Наклон внешней характеристики зависит как от внутреннего сопротивления  $R_k + jx_k$  трансформатора, так и от фазового сдвига  $\varphi_n$  между током и напряжением нагрузки. Для установления такой зависимости преобразуем выражение (1.21):

$$\begin{aligned}
U'_2 &= U_1 - (R_\kappa \cos \varphi_H + x_\kappa \sin \varphi_H) I'_2 = \\
&= U_1 - (R_\kappa \cos \varphi_H + x_\kappa \sin \varphi_H) \frac{z_\kappa}{z_\kappa} \cdot \frac{I'_{2\text{НОМ}}}{I'_{2\text{НОМ}}} I'_2 = \\
&= U_1 - \left( \frac{R_\kappa}{z_\kappa} \cos \varphi_H + \frac{x_\kappa}{z_\kappa} \sin \varphi_H \right) z_\kappa I'_{2\text{НОМ}} \cdot \frac{I'_2}{I'_{2\text{НОМ}}} = \quad (1.22) \\
&= U_1 - (\cos \varphi_\kappa \cos \varphi_H + \sin \varphi_\kappa \sin \varphi_H) U_{\kappa 3} \cdot \beta = \\
&= U_1 - \cos(\varphi_\kappa - \varphi_H) U_{\kappa 3} \cdot \beta,
\end{aligned}$$

где  $\varphi_\kappa$  – фазовый сдвиг между током и напряжением на внутреннем сопротивлении трансформатора и он для трансформатора является фиксированной величиной, причем  $0 < \varphi_\kappa < 90^\circ$ ;  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора по току.

Как следует из (1.22), наклон внешней характеристики зависит от напряжения короткого замыкания  $U_{\kappa 3}$  трансформатора и разности  $(\varphi_\kappa - \varphi_H)$  фазовых сдвигов:

- чем больше  $U_{\kappa 3}$ , тем круче наклон;
- для активно-индуктивной нагрузки с  $0 < \varphi_H < 90^\circ$  наклон всегда отрицательный, так как  $|(\varphi_\kappa - \varphi_H)| < 90^\circ$  и, поэтому  $\cos(\varphi_\kappa - \varphi_H) > 0$ ;
- для активно-индуктивной нагрузки отрицательный наклон максимален при  $(\varphi_\kappa - \varphi_H) = 0$ ;
- для активно-емкостной нагрузки с  $-90^\circ < \varphi_H < 0$  наклон будет нулевым при  $(\varphi_\kappa - \varphi_H) = 90^\circ$  и положительным при  $(\varphi_\kappa - \varphi_H) > 90^\circ$ .

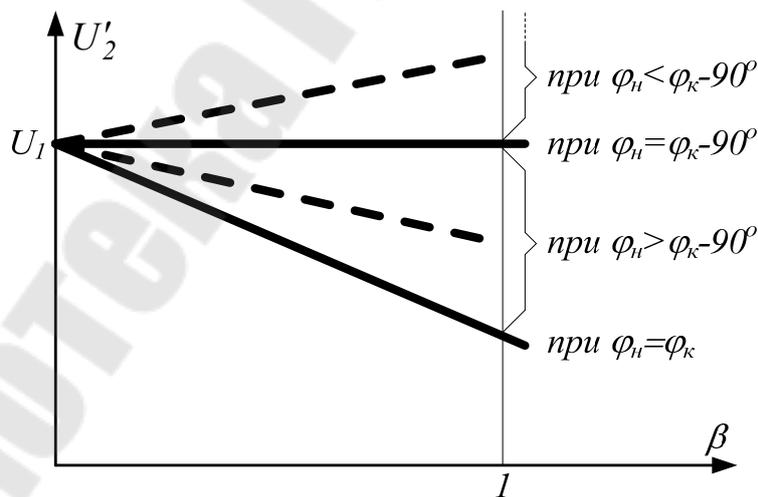


Рисунок 1.8 - Внешние характеристики трансформатора

## Вопросы и задания

1. Что такое «внешняя характеристика трансформатора» и чем определяется выбор метода ее расчета?
2. Приведите вывод формулы внешней характеристики трансформатора.
3. От чего зависит наклон внешней характеристики трансформатора?

### 1.7 Энергетическая диаграмма и КПД однофазного трансформатора

Назначением трансформатора является обеспечение нагрузки, подключенной к вторичной обмотке, активной мощностью  $P_2$  при заданном напряжении  $U_2$  на ней. При работе трансформатора возникают в нем потери активной мощности в меди  $P_m$ , нагревающие обмотки, и потери в стали  $P_{ст}$ , разогревающие магнитопровод. Из сети потребляется мощность  $P_1$ . Из первичной обмотки во вторичную передается через переменное магнитное поле электромагнитная мощность  $P_{эм}$ . Энергетическая диаграмма отображает в графической форме связь между названными мощностями (рис. 1.9).

Потери в стали  $P_{ст}$  не зависят от приведенного тока нагрузки  $I'_2$  и от физического тока  $I_2$  и, следовательно, от коэффициента загрузки трансформатора  $\beta$ .

Потери в меди  $P_m$  складываются из потерь в меди  $P_{m1}$  в первичной обмотке и потерь  $P_{m2}$  во вторичной обмотке и они прямо пропорциональны квадратам токов в обмотках. Если  $P_{mn}$  номинальные потери в меди, то при загрузке  $\beta$  по-тери  $P_m$  будут следующими:

$$P_m = \beta^2 P_{mn}.$$

Мощность  $P_2$  в нагрузке прямо пропорциональна току  $I'_2$  и, следовательно, коэффициенту загрузки  $\beta$ :

$$P_2 = \beta \cdot S_{2ном} \cos \varphi_n,$$

где  $S_{2ном} = U'_2 I'_2 = U_{2ном} I_{2ном}$  - полная номинальная мощность нагрузки.

Из диаграммы следует, что из сети потребляется мощность

$$P_1 = P_{ст.ном} + P_{m.ном} \beta^2 + \beta \cdot S_{2ном} \cos \varphi_n,$$

КПД трансформатора, равное отношению полезной мощности  $P_2$  к мощности потребленной  $P_1$ , определяется формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta \cdot S_{2\text{ном}} \cos \varphi_H}{P_{\text{ст.ном}} + P_{\text{м.ном}} \beta^2 + \beta \cdot S_{2\text{ном}} \cos \varphi_H}. \quad (1.23)$$

Зависимость КПД от коэффициента загрузки  $\beta$  представлена графиком на рис. 1.10. На графике есть точка с максимальным КПД  $\eta_{\text{max}}$ . Значение  $\beta$ , при котором достигается максимум КПД  $\eta_{\text{max}}$  из условия равенства нулю производной КПД  $\eta'$ , определенного выражением (1.23):

$$\eta' = \left( \frac{\beta \cdot S_{2\text{ном}} \cos \varphi_H}{P_{\text{ст.ном}} + P_{\text{м.ном}} \beta^2 + \beta \cdot S_{2\text{ном}} \cos \varphi_H} \right)' =$$

$$= \frac{S_{2\text{ном}} \cos \varphi_H (P_{\text{ст.ном}} - P_{\text{м.ном}} \beta^2)}{(P_{\text{ст.ном}} + P_{\text{м.ном}} \beta^2 + \beta \cdot S_{2\text{ном}} \cos \varphi_H)^2} = 0 \Rightarrow \beta = \sqrt{\frac{P_{\text{ст.ном}}}{P_{\text{м.ном}}}}.$$

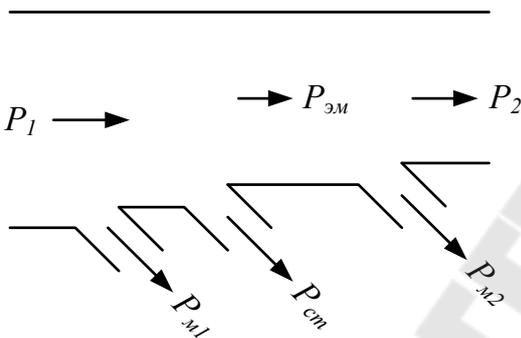


Рисунок 1.9 - Энергетическая диаграмма трансформатора

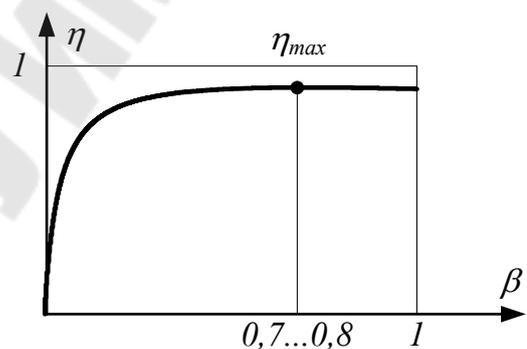


Рисунок 1.10 - Зависимость к.п.д. трансформатора от  $\beta$

Трансформатор проектируют так, чтобы максимум его КПД достигался при нагрузке  $\beta = 0,7 \dots 0,8$ . Для этого достаточно, чтобы при проектировании трансформатора между номинальными мощностями потерь  $P_{\text{ст.ном}}$  и  $P_{\text{м.ном}}$  было выдержано соотношение  $P_{\text{ст.ном}} = (0,5 \dots 0,65) P_{\text{м.ном}}$ , и тогда будет  $\beta = \sqrt{0,5 \dots 0,65} \approx 0,7 \dots 0,8$ .

### Вопросы и задания

1. Поясните смысл мощностей, отраженных на энергетической диаграмме.
2. Какие мощности зависят и не зависят от коэффициента загрузки  $\beta$ ?
3. При какой нагрузке  $\beta$  КПД трансформатора максимально?

## 1.8 Устройство трехфазного трансформатора и группы соединения его обмоток

В трехфазных сетях существует необходимость одновременного преобразования трех фазных напряжений. Для этого могут быть использованы три однофазных трансформатора (рис.1.11), первичные и вторичные обмотки которых соединяются или в звезду или в треугольник. Однако в такой конструкции слишком велик объем стали магнитопровода, который прямо пропорционален их длинам. Если считать магнитопровод в свету квадратным со стороной длиной  $a$ , то суммарная длина магнитопроводов составит  $12a$ . Также такая конструкция также занимает большую площадь помещения, в котором установлены трансформаторы.

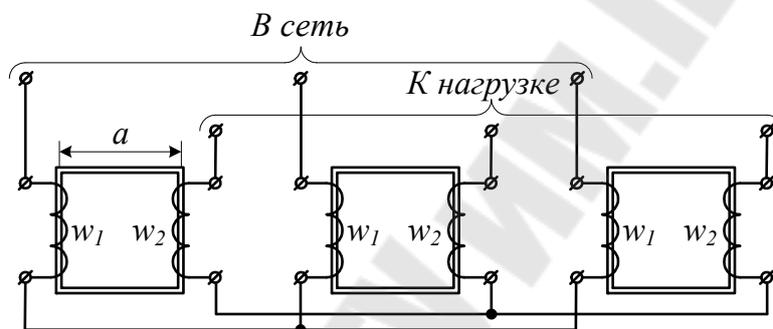


Рисунок 1.11 - Трансформация тремя однофазными трансформаторами

Намного меньшей суммарная длина магнитопровода может быть получена в конструкции, когда фазные обмотки трансформаторов размещены на одном стержне и трансформаторы соприкасаются противоположными стержнями (рис. 12, а). Образуется общий для трех трансформаторов участок магнитопровода, по которому проходят одновременно магнитные потоки  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_C$  трех фаз. Так как эти магнитные потоки сдвинуты во времени на треть периода вследствие существования аналогичного сдвига у трехфазных токов, то их сумма будет равной нулю:  $\dot{\Phi}_\Sigma = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$ . Далее следует очевидное: если в общем сердечнике нет магнитного поля, то такой сердечник не нужен и его можно не устанавливать (рис. 12, б). Суммарная длина магнитопроводов сократится до  $9a$ . Однако изготовить трехфазный трансформатор с таким магнитопроводом довольно сложно и дорого.

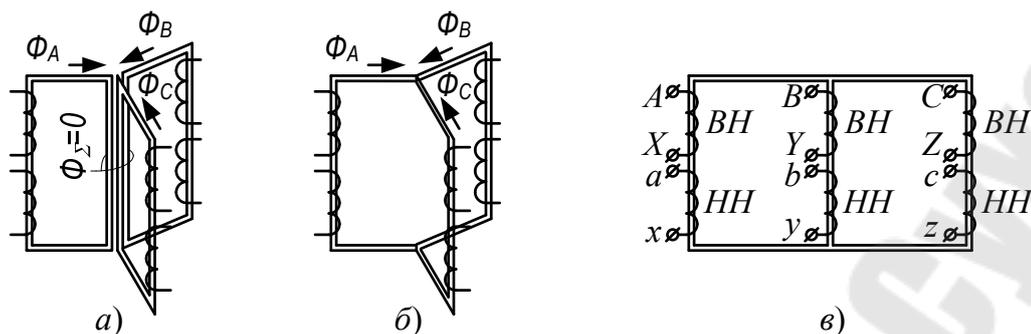


Рисунок 1.12 - Превращение конструкции из трех полных однофазных трансформаторов (а) в конструкцию из трех трансформаторов без общего сердечника (б) и в окончательную конструкцию трехфазного трансформатора (в)

Чтобы упростить и удешевить предыдущую конструкцию, магнитопровод изготавливают трехстержневым с расположением стержней в одной плоскости (рис. 12, в). Суммарная длина магнитопроводов составит  $7a$ , что почти вдвое меньше суммарной длины  $12a$  у трех однофазных трансформаторов. Трансформаторы с трехстержневым магнитопроводом чаще всего применяются на практике, и ниже будут рассматривать именно они.

На каждом стержне размещены обмотки высокого напряжения (ВН) и низкого (НН). Начала обмоток ВН маркируются «большими» буквами  $A, B, C$ , а концы – «большими» буквами  $X, Y, Z$ . Начала же обмоток НН маркируются «малыми» буквами  $a, b, c$ , а концы – «малыми» буквами  $x, y, z$ . Способы соединения обмоток в трехфазную схему называют группой соединения, которым присваивается по определенным правилам номер. На рис. 13, а обмотки соединены по схеме  $Y/Y$  и такое соединение нумеруется группой 0. На рис. 13, б обмотки соединены по схеме  $Y/\Delta$  и такое соединение нумеруется группой 11.

Группой соединения называется оцифрованный с использованием циферблата стрелочных часов сдвиг по фазе между линейными напряжениями обмоток ВН и НН.

Соединение обмоток ВН и НН по схеме  $Y/Y$  (рис. 1.13, а) образует группу 0. Для доказательства этого построим сначала векторные диаграммы фазных напряжений  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  и  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  обмоток ВН (рис. 1.13, б) и НН (рис. 1.13, в). Пары векторов  $\dot{U}_A$  и  $\dot{U}_a$ ,  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_b$ ,  $\dot{U}_C$  и  $\dot{U}_c$  будут параллельны друг другу, так как в расположенных на стержнях парах катушек ВН и НН магнитный поток общий и, следовательно, напряжения в указанных катушках будут синфазны с нулевым электрическим сдвигом по фазе.

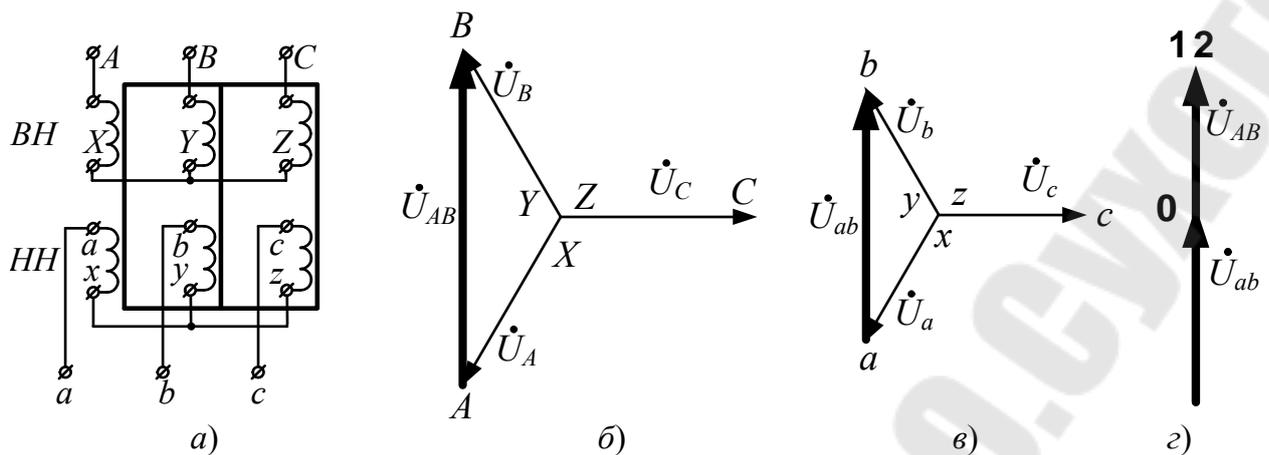


Рисунок 1.13 - Группа 0 соединения обмоток трансформатора: принципиальная схема (а), векторные диаграммы напряжений обмоток ВН (б) и НН (в), векторная диаграмма для линейных напряжений обмоток ВН и НН (г)

На базе векторов фазных напряжений, например  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_b, \dot{U}_a$  строим вектора линейных напряжений  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{ab}$ . Вектора  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{ab}$  будут параллельные. Строим заключительную диаграмму из векторов  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{ab}$  (рис. 1.13, г). Длинный вектор  $\dot{U}_{AB}$  принимаем за минутную стрелку и направляем на цифру 12 циферблата часов. Тогда короткий вектор  $\dot{U}_{ab}$ , принятый за часовую стрелку, укажет на 0 часов. Это дало название группе соединения 0.

Соединение обмоток ВН и НН по схеме Y/Δ (рис. 1.14, а) образует группу 11. Для доказательства этого построим сначала векторные диаграммы фазных напряжений  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  и  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  обмоток ВН (рис. 1.14, б) и НН (рис. 1.14, в). Пары векторов  $\dot{U}_A$  и  $\dot{U}_a, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_b, \dot{U}_C$  и  $\dot{U}_c$  будут параллельны друг другу.

На базе векторов фазных напряжений, например  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  и  $\dot{U}_b, \dot{U}_a$  строим вектора линейных напряжений  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{ab}$ . Между векторами  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{ab}$  будет сдвиг по фазе  $30^\circ$ . Строим заключительную диаграмму из векторов  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{ab}$  (рис. 1.14, г). Длинный вектор  $\dot{U}_{AB}$  принимаем за минутную стрелку и направляем на цифру 12 циферблата часов. Тогда короткий вектор  $\dot{U}_{ab}$ , принятый за часовую стрелку, укажет на 11 часов. Это дало название группе соединения 11.

В принципе возможны еще 10 групп соединения обмоток трехфазного трансформатора. Однако в силовых цепях применяют трансформаторы только с двумя рассмотренными группами – 0 и 11. Трансформаторы с

другими группами соединения могут использоваться в системах автоматики, например, в системах импульсно фазового управления трехфазными выпрямителями.

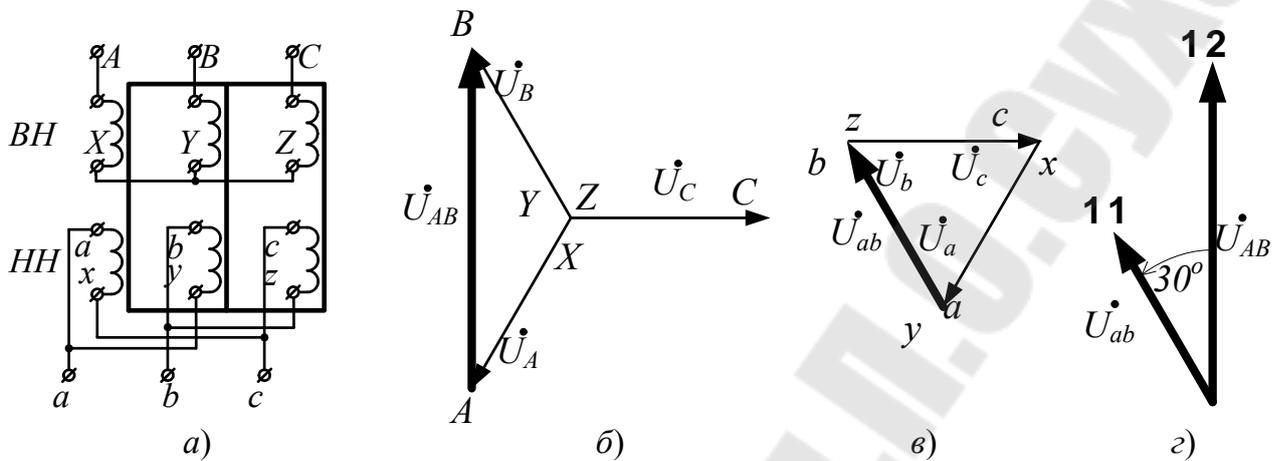


Рисунок 1.14 - Группа 11 соединения обмоток трансформатора: принципиальная схема (а), векторные диаграммы напряжений обмоток ВН (б) и НН (в), векторная диаграмма для линейных напряжений обмоток ВН и НН (г)

### Вопросы и задания

1. Поясните возможные конструкции систем трансформации трехфазных напряжений.
2. Какие схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора существуют и где применяются соответствующие трансформаторы?
3. Поясните схему трехфазного трансформатора с группой 0.
4. Поясните схему трехфазного трансформатора с группой 11.

## 1.9 Уравнения трехфазного трансформатора.

### Векторные диаграммы нагруженного трансформатора

В трехфазном трансформаторе все три катушки первичной и три катушки вторичной обмоток расположены на трех стержнях одного Ш-образного магнитопровода (рис. 1.12, в). Поэтому существует магнитная связь не только между парами фазных обмоток ВН и НН, но и между всеми шестью обмотками. Для однофазного трансформатора, в котором магнитная связь существовала только между парой обмоток – первичной и вторичной, была составлена схема замещения и она описана системой уравнений (1.18). По этим уравнениям можно рассчитать либо аналитически, либо с использованием векторных диаграмм напряжения и тока на всех элементах нагруженного трансформатора. Положительным эффектом

от представления однофазного трансформатора схемой замещения является замена сложных расчетов трансформатора как устройства с магнитно-связанными цепями на простые расчеты схемы без магнитно-связанных цепей. Так по схеме замещения просто рассчитываются его рабочие характеристики – внешняя характеристика и КПД. Естественно, целесообразен такой же переход к схеме замещения трехфазного трансформатора. Однако такой переход в общем случае невозможен с применением преобразований, приведенных на рис. 1.3 для однофазного трансформатора из-за взаимного влияния шести обмоток трехфазного трансформатора.

Вид схемы замещения, уравнения и векторных диаграммы трехфазного трансформатора зависят от группы соединения его обмоток, наличия или отсутствия нулевого провода в соединенных в  $Y$  обмотках и свойства симметрии или асимметрии нагрузки.

При симметричной нагрузке и любой группе соединения обмоток трехфазный трансформатор может быть представлен в виде трех одинаковых схем замещения для каждой из фаз. Для каждой из трех схем замещения составляются уравнения, аналогичные уравнениям (1.18) однофазного трансформатора, причем для каждого уравнения используется своё фазное напряжение:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1A} \text{ для фазы } A;$$

$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1B} = \dot{U}_{1A} e^{-j\frac{2\pi}{3}} = \dot{U}_{1A} a$  для фазы  $B$ , напряжение которой отстает от напряжения фазы  $A$  на  $\frac{2\pi}{3}$ , где буквой  $a$  обозначен множитель  $e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ ;

$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1C} = \dot{U}_{1A} e^{-j\frac{4\pi}{3}} = \dot{U}_{1A} a^2$  для фазы  $C$ , напряжение которой отстает от напряжения фазы  $A$  на  $\frac{4\pi}{3}$ .

Далее для каждой из трех фаз строятся векторные диаграммы видов, представленных на рис. 1.6 и 1.7, причем векторная диаграмма для фазы  $B$  повернута на  $-120^\circ$  к диаграмме фазы  $A$ , а диаграмма фазы  $C$  – на  $-240^\circ$ .

При несимметричной нагрузке трехфазного трансформатора для каждой его фазы составляются три схемы замещения, подводятся три различных системы напряжений питания первичных обмоток и рассчитываются для каждой фазы по три тока – ток прямой  $I_{np}$ , обратной  $I_{обр}$  и нулевой  $I_0$  последовательностей. Обоснование такого подхода к составлению уравнений и векторных диаграмм иллюстрируется построениями, приве-

денными на рис. 1.15. Реальные фазные токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  обмоток трансформатора представляются в виде трех систем токов:

- прямой последовательности фаз  $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$ , в которой ток  $\dot{I}_{b1}$  отстает на  $120^\circ$  от тока  $\dot{I}_{a1}$ , а ток  $\dot{I}_{c1}$  отстает от тока  $\dot{I}_{a1}$  на  $240^\circ$  (рис. 1.5, б);
- обратной последовательности фаз  $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$ , в которой ток  $\dot{I}_{b2}$  опережает на  $120^\circ$  ток  $\dot{I}_{a2}$ , а ток  $\dot{I}_{c2}$  опережает ток  $\dot{I}_{a2}$  на  $240^\circ$  (рис. 1.5, в);
- нулевой последовательности фаз  $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$ , в которой все токи совпадают по фазе (рис. 1.5, г).

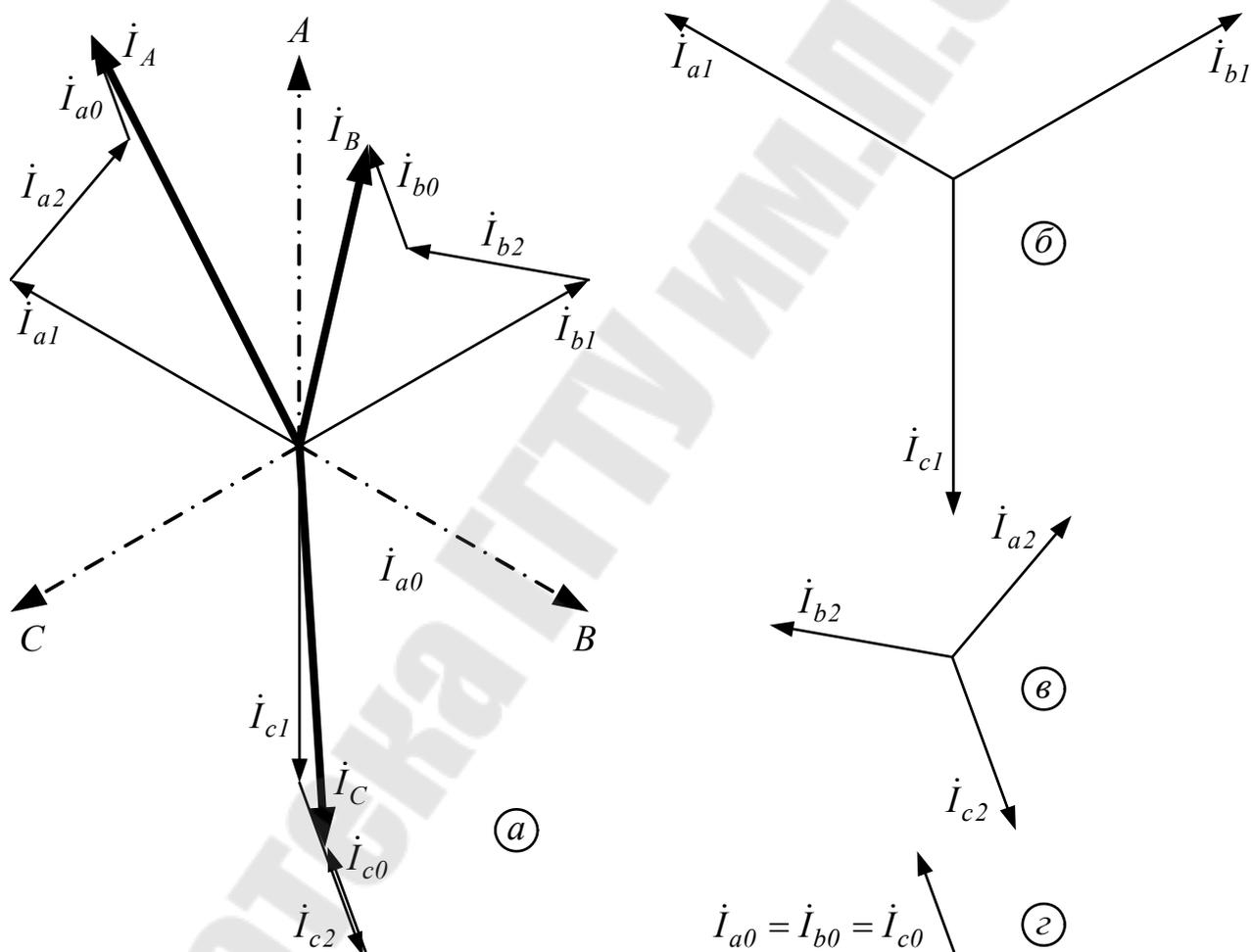


Рисунок 1.15 - Представление фазных токов в виде систем токов прямой, обратной и нулевой последовательностей (а) и векторные диаграммы токов прямой (б), обратной (в) и нулевой (г) последовательностей

Для расчета каждой системы токов существует схемы замещения вида, приведенного на рис. 1.3. Каждая схема рассчитывается независимо от

другой, без учета взаимосвязей между шестью обмотками трансформатора, причем:

- для расчета токов  $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$  используется система трех напряжений, в которой напряжения фаз  $B$  и  $C$  отстают от напряжения фазы  $A$  на угол, соответственно,  $120^\circ$  и  $240^\circ$ ;

- для расчета токов  $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$ , используется система трех напряжений, в которой напряжения фаз  $B$  и  $C$  опережают напряжение фазы  $A$  на угол, соответственно,  $120^\circ$  и  $240^\circ$ ;

- для расчета токов  $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$ , одно и то же напряжение.

Способы определения входных напряжений трансформатора и схем замещений для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей приводятся в полных учебниках по электрическим машинам.

### Вопросы и задания

1. Почему для трехфазного трансформатора невозможно составить схемы замещения обмоток по процедурам, которые использовались при составлении схемы замещения однофазного трансформатора?

2. Какие схемы замещения используются для трехфазного трансформатора, работающего на симметричную нагрузку и как выполняется расчет?

3. Какие схемы замещения используются для трехфазного трансформатора, работающего на несимметричную нагрузку и как выполняется расчет?

### 1.10 Параллельная работа трехфазных трансформаторов

В сетях электроснабжения на подстанциях устанавливается не менее двух трехфазных трансформаторов, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного трансформатора):

1. Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного трансформатора;

2. Обеспечивается экономичная работа трансформаторной подстанции, в которой загрузка параллельно работающих трансформаторов может поддерживаться на уровне максимально приближенной к загрузке  $0,7...0,8$ , на которой КПД трансформатора максимально (рис. 1.10). Так, если нагрузка двух параллельно работающих трансформаторов составляет  $0,35...0,4$ , то при выводе из работы одного трансформатора, оставшийся в работе трансформатор загрузится до  $0,7...0,8$ ;

3. Исключается перегрузка трансформаторов. Так, если работающие трансформаторы нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один трансформатор, который

возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие трансформаторы;

Для реализации параллельной работы трехфазных трансформаторов должны быть выполнены следующие условия (рис. 1.16):

1. Должны быть одинаковыми высокое (ВН) и низкое напряжение (НН) трансформаторов и, следовательно, коэффициенты трансформации. При невыполнении этого условия к замкнутой цепи, состоящей из параллельно включенных, например, двух трансформаторов, с разными напряжениями  $U_{21}$  и  $U_{22}$  вторичных обмоток, прикладывается разностное напряжение  $\Delta U_2 = U_{21} - U_{22}$  (рис. 1.16, а). Напряжением  $\Delta U_2$  в замкнутой цепи создается уравнивающий ток  $I_{ур}$ , который разогревает обмотки обоих трансформаторов даже на холостом ходу их. Так, если  $\Delta U_2$  составляет всего лишь  $(0,04...0,07) U_{2ном}$ , то уравнивающий ток равен номинальному току. В этом случае к трансформатору нельзя подключать никакой нагрузки.

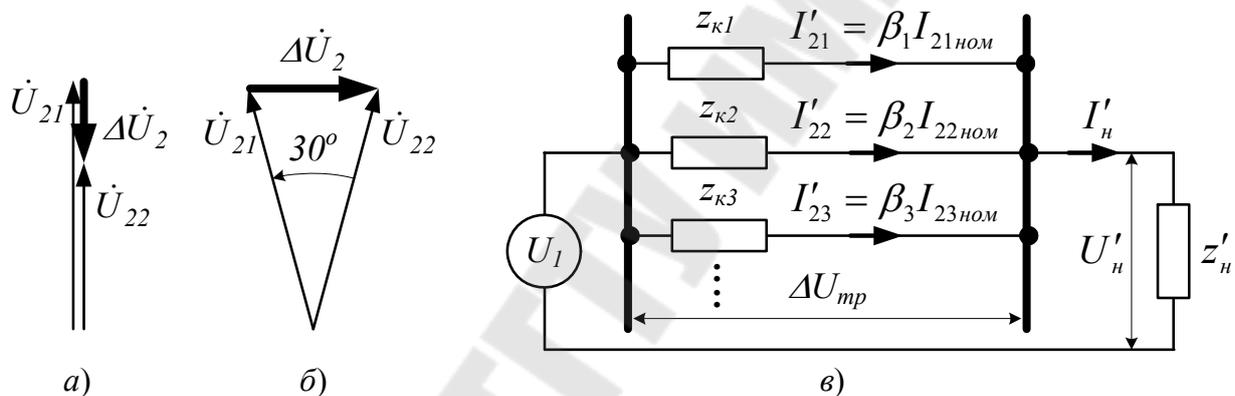


Рисунок 1.16 - Векторные диаграммы вторичных напряжений параллельно работающих трансформаторов при неравенстве вторичных напряжений (а), несовпадении групп соединения (б) и схема к расчету при неравенстве напряжений короткого замыкания (в)

2. Должны быть одинаковые группы соединения обмоток трансформаторов: либо все трансформаторы должны иметь группу 0, либо 11. У трансформаторов с группами 0 и 11 сдвиг между линейными напряжениями вторичных обмоток составляет  $30^\circ$  (рис. 1.13 и 1.14). При невыполнении этого условия к замкнутой цепи, состоящей из параллельно включенных, например, двух трансформаторов, с равными напряжениями  $U_{21}$  и  $U_{22}$  вторичных обмоток, прикладывается разностное напряжение  $\Delta \dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22}$ , которое составляет  $0,52U_{2ном}$ , где  $0,52 = 2\sin 15^\circ$  (рис. 1.16, б). При таком  $\Delta U_2$  по обмоткам обоих трансформаторов протекает уравнивающий ток  $I_{ур}$  близкий к току короткого замыкания.

3. При подключении к общим шинам подстанции чередование фаз трансформаторов должно быть одинаковым, например, к шине  $A$ , подключать все выводы обмоток, отмеченные буквой  $A$ . Также должно быть одинаковое чередование фаз и во вторичной цепи параллельно включенных трансформаторов. При невыполнении этого условия создается режим короткого замыкания трансформаторов. Трансформаторы будут отключены защитой.

4. Напряжения короткого замыкания  $U_{кз}$  должно быть одинаковым у всех трансформаторов. При невыполнении этого условия коэффициенты загрузки  $\beta$  параллельно работающих трансформаторов будут разными и, следовательно, часть трансформаторов будут недогружены, а другие – будут перегружены. Для пояснения этого явления приведем расчеты по схеме, приведенной на рис. 1.16, в.

Трансформаторы, которые считаем загруженными, изображены простейшей схемой замещения в виде сопротивления  $\dot{z}_к = R_к + jx_к$  короткого замыкания (рис. 1.3, ж). Из схемы (рис. 1.16, в) следует:

- падение напряжения  $\Delta U_{тр}$  для всех трансформаторов одинаковое;  
 - для каждого трансформатора напряжение  $\Delta U_{тр}$  вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta U_{тр} &= z_{к1} I'_{21} = z_{к1} \beta_1 I'_{21ном} = z_{к1} I'_{21ном} \beta_1 = U_{кз1} \beta_1, \\ \Delta U_{тр} &= z_{к2} I'_{22} = z_{к2} \beta_2 I'_{22ном} = z_{к2} I'_{22ном} \beta_2 = U_{кз2} \beta_2, \\ \Delta U_{тр} &= z_{к3} I'_{23} = z_{к3} \beta_3 I'_{23ном} = z_{к3} I'_{23ном} \beta_3 = U_{кз3} \beta_3, \end{aligned} \quad (1.24)$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению тока трансформатора к его номинальному значению  $I'_{2ном}$ ;  $z_{к} I'_{2ном}$  равно напряжению  $U_{кз}$  трансформатора (рис. 1.5, в).

Если напряжения короткого замыкания  $U_{кз1}$ ,  $U_{кз2}$  и  $U_{кз3}$  всех параллельно работающих трансформаторов одинаковые, то при одном и том же значении  $\Delta U_{тр}$  из (1.24) следует совпадение коэффициентов загрузки трансформаторов:

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3.$$

### Вопросы и задания

1. Какие преимущества у схемы электропитания, состоящей из параллельно работающих трансформаторов?
2. Назовите условия параллельной работы трехфазных трансформаторов и приведите их обоснование.

## 1.11 Влияние группы соединения обмоток на форму вторичного напряжения трансформатора

### Вводная часть

Явления, которые будут рассмотрены ниже, основаны на учете нелинейности кривой намагничивания стали магнитопровода трехфазного трансформатора. Эти рассмотрения предваряем следующими положениями:

- ввиду малости отличия напряжения на обмотке трансформатора  $U$  и индуцируемой в ней переменным магнитным потоком ЭДС  $E$ , принимаем  $U \approx E$ ;
- мгновенное значение ЭДС  $e$ , индуцируемой переменным магнитным потоком  $\Phi$  и поток связаны зависимостью

$$e(t) = -w \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (1.25)$$

- если магнитный поток  $\Phi(t)$  изменяется по гармоническому закону (синусоидален), то в соответствии с (1.25) также синусоидальна ЭДС  $e(t)$  и при несинусоидальном потоке  $\Phi(t)$  также несинусоидальная ЭДС  $e(t)$ ;

- несинусоидальный поток  $\Phi(t)$  или ток  $i(t)$  в обмотке трансформатора представляем в виде суммы гармонических составляющих, в которых содержится основная гармоника с частотой питающего трансформатор напряжения (50 Гц) и ближайшая гармоника с утроенной частотой 150 Гц.

Пусть ток  $i(t)$  в обмотке трансформатора синусоидален (рис. 1.17, а). Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени магнитного потока  $\Phi(t)$ :

- задаемся одинаковым временем по осям  $t$  для графиков  $i(t)$  и  $\Phi(t)$ , отложив точки 1 и 2 на одинаковых расстояниях от относительно точек  $0_i(t)$  и  $0_\Phi(t)$  начала отсчета по времени для графиков  $i(t)$  и  $\Phi(t)$ ;

- по точке 1 находим значение тока  $i(t)$  в точке 3, затем находим точку 4 на графике  $\Phi(i)$ ;

- на пересечении линий 2-5 и 4-5 находим точку графика  $\Phi(t)$ .

По построениям получен несинусоидальный график  $\Phi(t)$ . В соответствии с (1.25) индукционная ЭДС  $e(t)$  будет несинусоидальной и, следовательно, будет несинусоидальным напряжением  $u(t)$  на обмотке трансформатора. Несинусоидальный поток  $\Phi(t)$  может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих  $\Phi_{1Г}(t)$  и  $\Phi_{3Г}(t)$ . Точно также напряжение  $u(t)$  может быть представлено в виде суммы гармонических составляющих  $u_{1Г}(t)$  и  $u_{3Г}(t)$ .

Пусть магнитный поток  $\Phi(t)$  в магнитопроводе трансформатора синусоидален (рис. 1.17, б). В соответствии с (1.25) индукционная ЭДС  $e(t)$

будет синусоидальная и, следовательно, будет синусоидальным напряжением  $u(t)$  на обмотке трансформатора. Используя кривую намагничивания магнитопровода трансформатора, строим график изменения во времени тока  $i(t)$  в обмотке трансформатора.

По построениям получен несинусоидальный график  $i(t)$ . Несинусоидальный поток  $\Phi(t)$  может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих  $\Phi_{1Г}(t)$  и  $\Phi_{3Г}(t)$ .

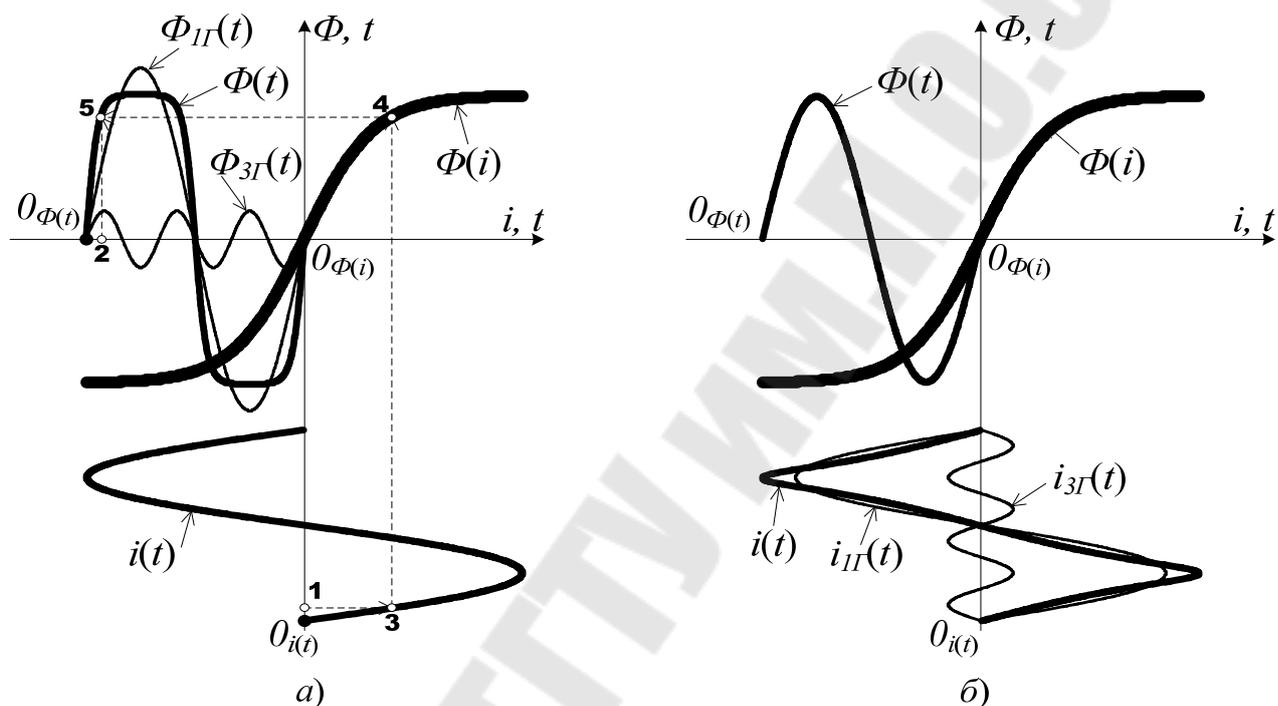


Рисунок 1.17 - Графики сигналов магнитного потока  $\Phi(t)$  и порождающего его тока  $i(t)$  при синусоидальном токе (а) и магнитном потоке (б)

### Основная часть

Считаем линейные и фазные напряжения первичных обмоток синусоидальными. Определим форму вторичного напряжения трансформатора при заданной схеме соединения его обмоток.

#### 1. Схема соединения обмоток $Y_0/Y$

Так как по линейным проводам и нулевому проводу к первичной обмотке трансформатора подведено синусоидальное напряжение, то и в соответствии с (1.25) будет синусоидальным магнитный поток  $\Phi(t)$ . Этим потоком во вторичной обмотке будет наведена синусоидальная ЭДС и, следовательно, фазные и линейные напряжения на вторичной обмотке будут синусоидальными. В соответствии с рис. 1.17, б токи первичных обмоток  $i(t)$

будут несинусоидальными и в них будут присутствовать гармонические токи  $i_{1Г}(t)$  и  $i_{3Г}(t)$ . Сумма первых гармоник  $i_{1Г}(t)$ , сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$  электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники  $i_{3Г}(t)$  будут синфазными и их сумма не будет нулевой (рис. 1.18). Суммарный ток третьих гармоник потечет по нулевому проводу. Следовательно, режим синусоидальных магнитных потоков  $\Phi(t)$  осуществим, а на вторичной обмотке напряжения будут идеальными по форме – синусоидальными. Однако такое включение на практике не применяется, так как первичное напряжение, приходящее с линий электропередачи, всегда подводится с помощью трех линейных проводов, а нулевого провода в сети просто нет.

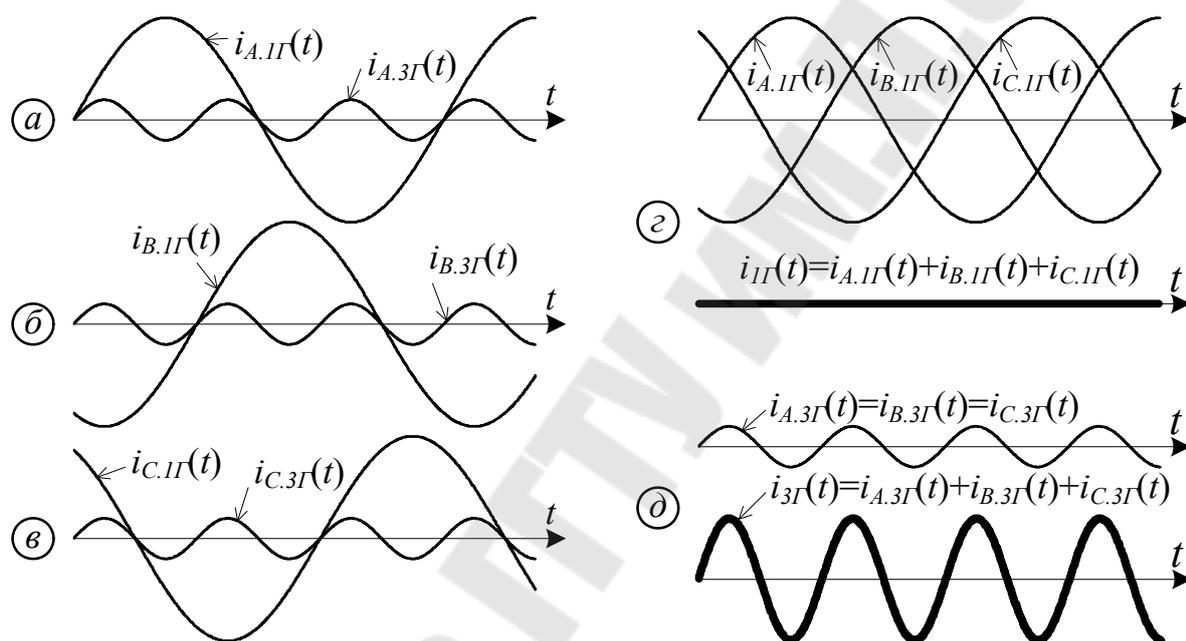


Рисунок 1.18 - Гармонические составляющие токов фазы A (а), фазы B (б), фазы C (в) и суммы первых (z) и третьих (д) гармонических составляющих

## 2. Схема соединения обмоток Y/Y (группа 0)

Так как линейного провода нет, то к трансформатору подводятся только линейные синусоидальные напряжения. Докажем, что токи первичных обмоток будут синусоидальными. Предположим обратное – токи первичных обмоток несинусоидальные. Тогда в таких токах помимо основной гармоники должна существовать третья гармоника (рис. 1.17, б). Третьи гармоники будут синфазными и сумма их не будет нулевой. Однако для суммарного тока третьих гармоник нет провода, по которому он потёк бы. Следовательно, третьих гармоник в первичных токах не может быть и первичные токи только синусоидальные. При синусоидальных первичных токах магнитные потоки обмоток будут несинусоидальными (рис. 1.17, а).

В соответствии с (1.25) во вторичных обмотках будут наведены несинусоидальные ЭДС, а вторичные напряжения будут несинусоидальными. Недостатком трансформатора с соединением обмоток  $Y/Y$  (группа 0) в том, что со вторичной обмотки к потребителям подается несинусоидальное (искаженное по форме) трехфазное напряжение.

### 3. Схема соединения обмоток $Y/\Delta$ (группа 11)

Так же как и предыдущем случае с группой 0 во вторичных обмотках индуцируются несинусоидальные фазные ЭДС. Сумма первых гармоник указанных ЭДС, сдвинутых относительно друг друга на  $120^\circ$  электрических градусов, будет равна нулю. Третьи гармоники ЭДС будут синфазными и их сумма не будет нулевой. Суммарная ЭДС третьей гармоники создаст в замкнутой цепи вторичных обмоток контурный ток, который создаст в сердечниках трансформатора магнитные потоки утроенной частоты. Эти потоки, в соответствии с правилом Ленца будут находиться в противофазе к магнитным потокам третьей гармоники, сформировавшиеся в первичной обмотке. Так эти потоки третьих гармоник практически равны друг другу, то они практически взаимно компенсируются. В итоге в сердечнике трансформатора останется только поток первой гармоник и, следовательно, вторичные напряжения будут синусоидальными.

Из рассмотренных вариантов схем включения и питания обмоток трансформатора предпочтительной является схема  $Y/\Delta$  с группой 11. Именно такие трансформаторы целесообразно ставить на вводе подстанции.

### Вопросы и задания

1. Почему при синусоидальном токе в обмотке трансформатора магнитный поток, ЭДС и напряжение обмотки несинусоидальное?
2. Почему при синусоидальном магнитном потоке в магнитопроводе трансформатора ЭДС, напряжение обмотки будут синусоидальными, а ток - несинусоидальным?
3. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток.
4. Обоснуйте несинусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/Y$ .
5. Обоснуйте синусоидальную форму вторичного напряжения трехфазного трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ .

## 1.12 Переходные процессы при коротком замыкании трансформатора

При коротком замыкании по обмоткам трансформатора протекают большие токи, в сравнении с которыми ток  $I_0$  цепи намагничивания (рис. 1.3, д) чрезвычайно мал. Поэтому можно в расчетах использовать простейшую схему замещения трансформатора (рис. 1.3, ж). Схема трансформатора в режиме КЗ представлена на рис. 1.19. В расчетах используется мгновенное значение напряжения  $u_1$  питания трансформатора, и для тока КЗ  $i_{кз}$  рассчитывается также мгновенное значение. До момента КЗ трансформатор работал вхолостую.

Дифференциальное уравнение схемы имеет вид

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_{\kappa} \frac{di_{кз}}{dt} + R_{\kappa} i_{кз} \quad (1.26)$$

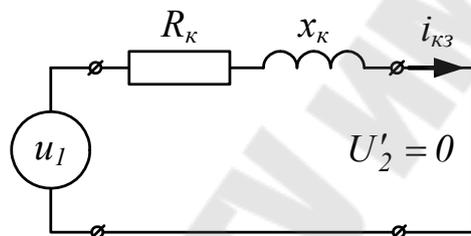


Рисунок 1.19 - Расчетная схема к.з. трансформатора

Общее решение дифференциального уравнения равно сумме принужденной составляющей  $i_{np}$  и свободной  $i_{св}$ :

$$i_{кз} = i_{np} + i_{св} \quad (1.27)$$

Принужденная составляющая тока  $i_{св}$  является током установившегося режима. Ток  $i_{np}$  определяется для установившегося режима схемы, и при входном синусоидальном напряжении  $u_1$  ток также синусоидальный, но отстающий от напряжения на электрический угол  $\varphi = \arctg \frac{x_{\kappa}}{R_{\kappa}}$ :

$$i_{np} = \frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi).$$

Вид свободной составляющей тока  $i_{св}$  КЗ зависит от корней характеристического уравнения, составленного на основе дифференциального уравнения (правой части уравнения (1.26)):

$$L_{\kappa} p + R_{\kappa} = 0 \Rightarrow p = -\frac{R_{\kappa}}{L_{\kappa}} \Rightarrow i_{\text{св}} = C \cdot e^{-\frac{R_{\kappa} t}{L_{\kappa}}}.$$

Общее решение в соответствии с (1.27) и с учетом найденных значений  $i_{\text{пр}}$  и  $i_{\text{св}}$  имеет вид

$$i_{\text{кз}} = \frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_{\kappa} t}{L_{\kappa}}}. \quad (1.28)$$

Постоянную интегрирования  $C$  находим из начального условия: в момент времени  $t=0$  ток трансформатора нулевой (до к.з. трансформатор работал вхолостую):

$$0 = \frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \sin(\omega 0 + \alpha_0 - \varphi) + C \cdot e^{-\frac{R_{\kappa} 0}{L_{\kappa}}} \Rightarrow C = -\frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \sin(\alpha_0 - \varphi).$$

Общее решение примет вид

$$i_{\text{кз}} = \frac{U_{1m}}{z_{\kappa}} \left[ \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) - \sin(\alpha_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_{\kappa} t}{L_{\kappa}}} \right]. \quad (1.29)$$

Вид графика тока КЗ, построенного по выражению (1.29), зависит от начальной фазы  $\alpha_0$  напряжения сети  $u_1$  в момент короткого замыкания (рис. 1.20).

При  $\alpha_0 - \varphi = 0$  ток КЗ  $i_{\text{кз}}$  не будет содержать свободной составляющей, так как  $\sin(\alpha_0 - \varphi) = 0$ . Ток КЗ станет сразу установившимся с амплитудой  $U_{1m}/z_{\kappa}$  и действующим значением  $U_1/z_{\kappa}$  (рис. 1.20, а). Произведем оценку этого тока:

$$\begin{aligned} I_{\text{кз.уст}} &= \frac{U_1}{z_{\kappa}} = \frac{U_1 I_{1.\text{НОМ}}}{z_{\kappa} I_{1.\text{НОМ}}} = \frac{U_1 I_{1.\text{НОМ}}}{U_{\text{кз}}} = \frac{U_1}{U_{\text{кз}}} I_{1.\text{НОМ}} = \\ &= \frac{U_1}{(0,045 \dots 0,07) U_1} I_{1.\text{НОМ}} = (14 \dots 22) I_{1.\text{НОМ}} \end{aligned} \quad (1.30)$$

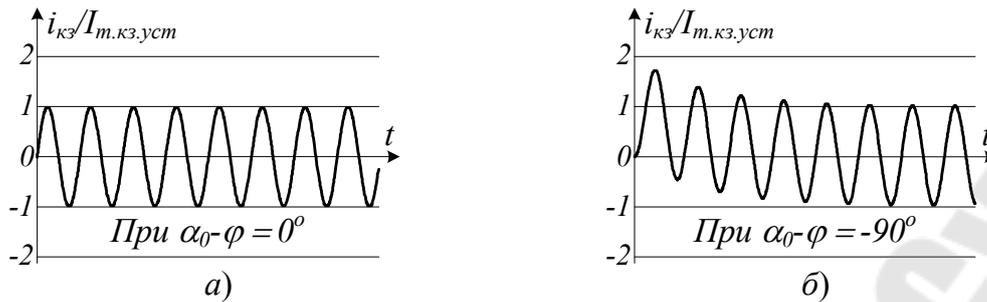


Рисунок 1.20 - Ток короткого замыкания только с принужденной составляющей (а) и с максимальным действием свободной составляющей (б)

Установившийся ток КЗ трансформатора в 14...22 раза больше номинального и он опасен для трансформатора, так как:

- приводит к быстрому разогреву обмоток и обугливанию изоляции провода обмоток;
- сопровождается большими динамическими усилиями притяжения соседних витков обмоток (усилия увеличиваются в 142...222≈200...500 раз) и приводит к механическому разрушению (растрескиванию) изоляции.

Трансформатор должен быть немедленно отключен от сети.

При  $\alpha_0 - \varphi = -90^\circ$  ток КЗ  $i_{кз}$  будет содержать свободную составляющую с максимальной ее интенсивностью, так как  $\sin(\alpha_0 - \varphi) = -1$ . Синусоидальная (принужденная) составляющая тока КЗ будет максимально смещена вверх (рис. 1.20, б). Максимальное значение тока КЗ, образующееся в этом случае, называется ударным током  $I_{yд}$ . Ток КЗ достигает наибольшего (ударного) значения примерно в тот момент времени  $t_{yд}$ , когда будет максимум принужденной составляющей при  $\sin(\omega t_{yд} + \alpha_0 - \varphi) = 1$ :

$$I_{yд} = \sqrt{2} I_{кз.уст} \left( 1 + e^{-\frac{R_k t_{yд}}{L_k}} \right). \quad (1.31)$$

Значение выражения, заключенного в скобки в (1.31), для существующих трансформаторов составляет ≈1,7...1,8. С учетом оценки (1.30) значение ударного тока составляет

$$I_{yд} = \sqrt{2} I_{1.ном} (14...22) \cdot (1,7...1,8) = (34...59) I_{1.ном}. \quad (1.32)$$

Протекание столь большого тока по обмоткам трансформатора сопровождается большими динамическими усилиями притяжения соседних витков обмоток, а в защитной аппаратуре, отключающей трансформатор от

сети, интенсивно обгорают контакты. Поэтому, выбор отключающих автоматов защиты должен вестись с учетом ударного тока  $I_{уд}$ .

### Вопросы и задания

1. Как выглядит схема замещения трансформатора в режиме КЗ?
2. Как рассчитывают принужденную  $i_{пр}$  и свободную  $i_{св}$  составляющие тока КЗ?
3. Каковы оценки значения установившегося тока КЗ и чем он опасен для трансформатора?
4. Каковы оценки значения ударного тока КЗ и чем он опасен для трансформатора и защитной аппаратуры?

### 1.13 Переходные процессы при включении трансформатора в сеть

При включении трансформатора на холостом ходу вторичная обмотка разомкнута и схема замещения трансформатора (рис. 1.21, а) будет такой же, как в опыте холостого хода (рис. 1.4, б).

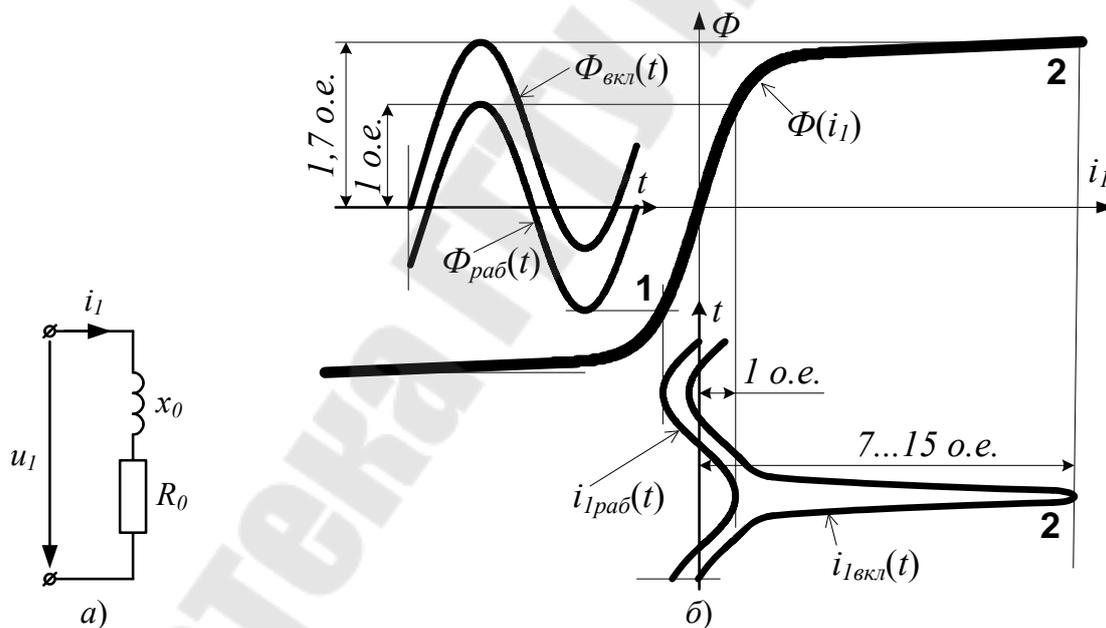


Рисунок 1.21 - Процессы при включения трансформатора на холостом ходу: схема замещения (а) и графики сигналов (б)

Дифференциальное уравнение трансформатора:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = L_0 \frac{di_1}{dt} + R_0 i_1. \quad (1.33)$$

При синусоидальном входном напряжении  $u_1$  потокосцепление  $\psi$  и магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике будут синусоидальными. Но ток  $i_1$  из-за насыщения стали магнитопровода будет несинусоидальным. Используя определение потокосцепления  $\psi = w\Phi = L_0 i_1$ , перепишем (1.33) в виде

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha_0) = w \frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_0}{L_0(i_1)} w\Phi, \quad )$$

где индуктивность  $L_0 i_1$  при постоянстве потокосцепления  $\psi = L_0 i_1$  зависит обратно пропорционально от тока  $i_1$ .

Индуктивность  $L_0$  мала на участках насыщения магнитопровода (рис. 1.21, б). В переходных процессах значение магнитного потока  $\Phi(t)$  только очень малую часть периода его изменения заходит на участок насыщения магнитопровода. Поэтому, оправдано использование в расчетах ненасыщенного значения индуктивности  $L_0$ :  $L_0(i_1) \rightarrow L_0(0) \equiv L_0$ .

Решение дифференциального уравнения (1.34) аналогично по форме решению (1.29) и имеет вид

$$\Phi = \frac{U_{1m}}{w} \left[ \sin(\omega t + \alpha_0 - \varphi) - \sin(\alpha_0 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R_0}{L_0} t} \right] \quad (1.35)$$

Из-за аperiodической (экспоненциальной) составляющей решения (1.35) график потокосцепления  $\Phi(t)$  сместится в худшем случае на 70...80% так, как это показано на рис. 1.20, б), т.е. амплитудное значение  $\Phi(t)$  вырастет в 1,7...1,8 раз. На рис. 1.21, б как раз показано изменение амплитуды  $\Phi(t)$  в 1,7 раза с образованием графика  $\Phi_{вкл}(t)$ . Построения с использованием кривой намагничивания  $\Phi(i_1)$  стали магнитопровода графика тока  $i_{1вкл}(t)$  дали искаженный график тока с амплитудой превышающей амплитуду тока рабочего режима  $i_{1раб}(t)$  в 7...15 раз. Затухание амплитуды магнитного потока  $\Phi_{раб}(t)$  до значения  $\Phi_{вкл}(t)$  происходит с постоянной времени  $T_0 = L_0/R_0$ . У трехфазных силовых трансформаторов большой мощности (сотни и тысячи киловатт) постоянная времени  $T_0$  велика и равна нескольким секундам. Поэтому, при включении таких трансформаторов импульсы тока  $i_{1вкл}(t)$  существуют достаточно долго, в течение нескольких единиц-десятков секунд и могут стать причиной отключения трансформатора устройствами его защиты по току короткого замыкания. Для того, чтобы при включении трансформатора длительно действующие импульсы тока не приводили к отключению трансформатора, должна быть применена специальная защита, различающая токи короткого замыкания и импульсы тока при включении на холостом ходу.

## Вопросы и задания

1. Обоснуйте вид схемы замещения трансформатора при его включении, составьте по схеме дифференциальное уравнение и обоснуйте правомерность использования в расчетах ненасыщенного значения индуктивности  $L_0$ .

2. Как выглядят графики магнитного потока и тока трансформатора при его включении?

3. Почему мощные силовые трансформаторы должны быть предусмотрены меры от отключения защитой при его вводе в работу?

### 1.14 Автотрансформатор, устройство, принцип действия, основные характеристики

Автотрансформатор содержит две обмотки (рис. 1.22), между которыми существует не только магнитная связь, но и гальваническая связь (с электрическим контактом).

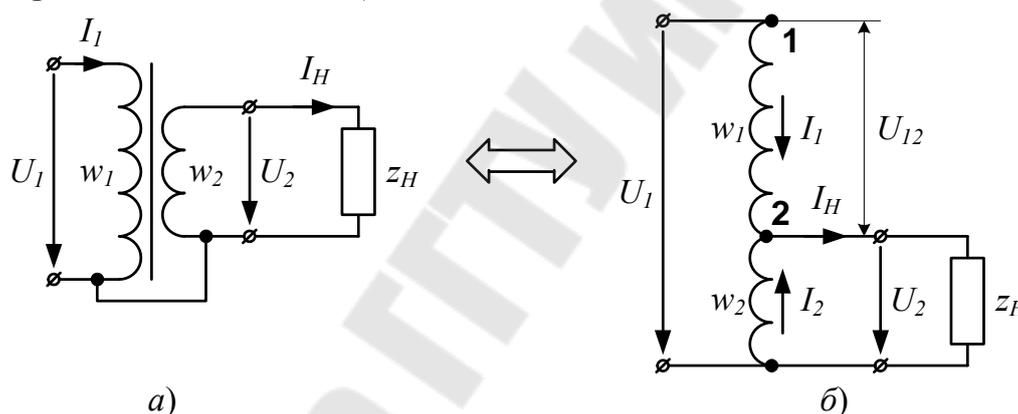


Рисунок 1.22 - Двухобмоточный трансформатор с электрической связью между обмотками (а) и автотрансформатор (б)

Преимущества автотрансформатора перед двухобмоточным трансформатором с отдельными обмотками установим на основании нижеприведенных расчетов.

Суммарное число витков  $w_{TP}=(w_1+w_2)_{TP}$  обмоток трансформатора, которое прямо пропорционально сумме напряжений  $U_1+U_2$  обеих обмоток, больше суммарного числа витков  $w_{ATP}=(w_1+w_2)_{ATP}$  обмоток автотрансформатора, которое прямо пропорционально приложенного к обеим обмоткам напряжению  $U_1$ .

Так как между обмотками существует магнитная связь, то внешние по отношению к трансформатору и автотрансформатору напряжения и токи связаны между собой коэффициентом трансформации:

$$\frac{U_1}{U_2} = k_{mp} \quad \text{и} \quad \frac{I_H}{I_1} = k_{mp}. \quad (1.36)$$

Для автотрансформатора справедливы еще два уравнения:

$$I_2 = I_H - I_1 \quad \text{и} \quad U_{12} = U_1 - U_2. \quad (1.37)$$

Из уравнений (1.36) и (1.37) следуют соотношения:

$$I_2 = I_H \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right), \quad U_{12} = U_1 \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right). \quad (1.38)$$

Для трансформаторов существует понятие – «габаритная мощность» (ГМ). Величина ГМ определяет размеры сердечника, вес трансформатора, длину проводников обмоток, количество охлаждающего масла, т.е. стоимость трансформатора и расходы на его эксплуатацию. Чем меньше ГМ, тем дешевле трансформатор и тем меньше затраты на эксплуатацию.

Для трансформатора и автотрансформатора суммы полных мощностей обмоток определяются выражениями:

$$S_{TP} = U_1 I_1 + U_2 I_H, \quad S_{ATP} = U_{12} I_1 + U_2 I_2. \quad (1.39)$$

Заменяем в  $S_{ATP}$  (1.39) значения  $U_{12}$  и  $I_2$  на значения, определенные формулами (1.38):

$$\begin{aligned} S_{ATP} &= U_1 I_1 \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right) + U_2 I_H \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right) = \\ &= (U_1 I_1 + U_2 I_H) \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right) = S_{TP} \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right). \end{aligned} \quad (1.40)$$

Потери мощности в меди меньше и соотносятся как

$$P_{M.ATP} = P_{M.TP} \left(1 - \frac{1}{k_{mp}}\right). \quad (1.41)$$

Преимущества автотрансформатора в сравнении с трансформатором:

1. Возможность регулирования выходного напряжения  $U_2$ , если контакт 2 выполнен скользящим.

2. Суммарное число витков обмоток у автотрансформатора меньше.
3. Ток  $I_2$  выходной обмотки меньше тока  $I_H$  в нагрузке (1.37) и, следовательно, эта обмотка может быть намотана проводом меньшего сечения.
4. Габаритная мощность автотрансформатора меньше - (1.40).
5. КПД автотрансформатора выше, так как у него меньшие потери в меди (1.41).

Недостатки автотрансформатора:

1. Повышенная опасность для персонала, так как между первичной и вторичной цепями автотрансформатора имеется электрический контакт и одна из двух обмоток высоковольтная.
2. Повышенный ток короткого замыкания, так как по мере поднятия движка 2 и, соответственно, при работе с  $k_{mp}$ , близким к единице, первичную и вторичную цепи разделяет короткий участок 1-2 с малым числом витков и, соответственно, с малым внутренним сопротивлением.

### Вопросы и задания

1. Поясните устройство и принцип действия автотрансформатора.
2. Как отличаются у трансформатора и автотрансформатора числа витков, токи в одноименных обмотках, габаритные мощности и КПД?
3. Назовите преимущества и недостатки автотрансформатора.

### 1.15 Сварочные трансформаторы, устройство, принцип действия, основные характеристики

Сварочные трансформаторы предназначены для использования в дуговой сварке. Для проведения сварки необходимы следующие параметры вторичной обмотки трансформатора: напряжение на холостом ходу в пределах 35...60 В, ток при максимальной нагрузке – до 500 А. Кроме того длительный ток короткого замыкания  $I_{K3}$  трансформатора должен быть ограничен безопасным для его значением (рис. 1.23, а). Внешняя характеристика должна быть Г-образной. При горящей дуге напряжение  $U_{гор}$  на ней составляет в среднем 35 В, а это практически вертикальный участок Г-образной внешней характеристике со стабильным током сварки.

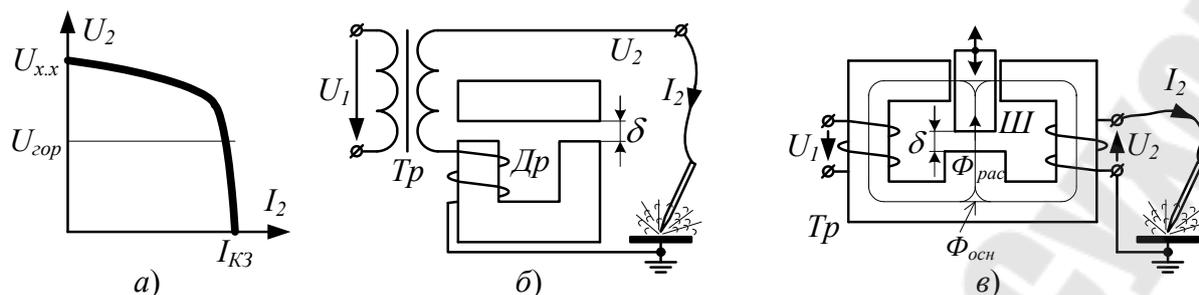


Рисунок 1.23 - Внешняя характеристика сварочного трансформатора (а), конструкция с регулировочным дросселем (б) и магнитным шунтом (в)

Для придания Г-образной формы внешней характеристике во вторичную цепь сварочного трансформатора вводят большое индуктивное сопротивление.

На рис. 1.23, б во вторичную цепь введен дроссель  $D_p$  с регулируемым индуктивным сопротивлением его. С увеличением зазора  $\delta$  уменьшается индуктивное сопротивление дросселя, а сварочный ток (его значение короткого замыкания  $I_{K3}$ ) увеличивается и наоборот.

На рис. 1.23, в между первичной и вторичной обмотками расположен сердечник, называемый магнитным шунтом  $III$  с регулируемым зазором  $\delta$ . На шунт замыкается часть магнитного потока, создаваемого обеими катушками, в результате чего потоки, замкнутые на шунт, не достигают другой обмотки. А это является определением потоков, замкнутых на шунт, как потоков рассеяния  $\Phi_{pac}$ . Связанное с потоками рассеяния индуктивное сопротивление представляет собой индуктивное сопротивление рассеяния. С увеличением зазора  $\delta$  поток рассеяния  $\Phi_{pac}$  уменьшается и сварочный ток (его значение короткого замыкания  $I_{K3}$ ) увеличивается и наоборот.

### Вопросы и задания

1. Какими должны быть параметры сварочного трансформатора и какова должна быть внешняя характеристика?
2. Поясните устройство и принцип действия сварочного трансформатора с регулировочным дросселем и магнитным шунтом.

### 1.16 Измерительные трансформаторы напряжения и тока

Измерительные трансформаторы используются всегда в цепях с напряжением выше 1000 В с целью обеспечения электробезопасности для обслуживающего персонала. Кроме этого, в установках с любым уровнем напряжения, но с большими токами (более 20...30 А) используются трансформаторы тока, так как измерительные приборы и датчики на большие токи не выпускаются. Кроме указанных особенностей применения измери-

тельных трансформаторов от них требуется гарантированная точность, так как к ним могут подключаться приборы коммерческого учета: счетчики активной и реактивной энергии, ваттметры и др.

Трансформатор напряжения. Его выполняют в виде двухобмоточного понижающего трансформатора (рис. 1.24, а) с  $k_{mp}=w_1/w_2$ . Стандартное вторичное напряжение равно 100 В. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала вторичную обмотку, изолированную от первичной, заземляют.

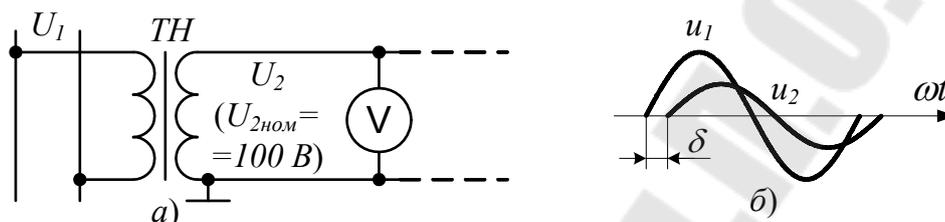


Рисунок 1.24 - Включение трансформатора напряжения (а), угловая погрешность (б)

Сопротивления обмоток вольтметров и других приборов, подключаемых к трансформатору напряжения, велики, поэтому он практически работает в режиме холостого хода. В этом режиме можно с достаточной степенью точности считать, что  $k_{mp}U_2 = U'_2 = U_1$ .

В действительности ток холостого хода  $I_0$  (а также небольшой ток нагрузки) создает в трансформаторе падение напряжения, поэтому, между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  есть разница и имеется некоторый сдвиг по фазе  $\delta$  (рис. 1.24, б). В результате при измерениях образуются погрешности двух видов:

а) относительная погрешность напряжения (%):

$$\Delta U_{\%} = \frac{k_{mp}U_2 - U_1}{U_1} 100;$$

б) угловая погрешность  $\delta_U$ , равная углу между векторами  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}'_2$ .

Трансформаторы напряжения подразделяют по погрешности  $\Delta U_{\%}$  на три класса точности: 0,5; 1 и 3. Угловая погрешность составляет 20...40 угл. мин.

Для уменьшения погрешностей  $\Delta U_{\%}$  и  $\delta_U$  сопротивления обмоток трансформатора  $R_1$  и  $R_2$  делают по возможности малыми, а магнитопровод выполняют из высококачественной стали достаточно большого поперечного сечения, чтобы в рабочем режиме он не был насыщен ( $B=0,6...0,8$  Тл). В результате ток холостого хода  $I_0$  настолько мал, что не влияет на погреш-

ности трансформатора напряжения. Также нельзя подключать к трансформатору приемников (вольтметров, катушек напряжения счетчиков и т.п.) сверх количества указанного в паспорте к нему.

Трансформатор тока. Его выполняют в виде двухобмоточного повышающего трансформатора (рис. 1.25, а) с  $k_{mp} = w_2/w_1$  или в виде проходного трансформатора (рис. 1.25, б), у которого первичной обмоткой служит провод, проходящий через окно магнитопровода. Стандартный вторичный ток равен 5 А.

Сопротивления обмоток амперметров и других приборов, подключаемых к трансформатору тока, обычно малы. Поэтому трансформатор тока практически работает в режиме короткого замыкания, в котором токи  $I_1$  и  $I_2$  во много раз больше тока  $I_0$ , и можно считать, что  $I'_2 = k_{mp} I_2 = I_1$ .

В действительности из-за наличия намагничивающего тока  $I_0$  в трансформаторе тока и между этими токами имеется некоторый сдвиг  $\delta$  по фазе. В результате при измерениях образуются погрешности двух видов:

а) относительная погрешность тока (%):

$$\Delta I_{\%} = \frac{k_{mp} I_2 - I_1}{I_1} 100;$$

б) угловая погрешность  $\delta_1$  равная углу между векторами  $\dot{I}'_2$  и  $\dot{I}_1$ .

Трансформаторы тока подразделяют по погрешности  $\Delta I_{\%}$  на пять классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3 и 10. Угловая погрешность составляет 20...120 угл. мин.

Для уменьшения токовой и угловой погрешностей стремятся уменьшить ток холостого хода теми же способами, что и в трансформаторе напряжения: обмотки трансформатора выполняют из провода большого сечения и магнитопровод выполняют большого поперечного сечения, чтобы в рабочем режиме он не был насыщен ( $B=0,6...0,8$  Тл). Также нельзя подключать к трансформатору приемников (амперметров, токовых катушек счетчиков и т.п.) сверх количества указанного в паспорте к нему.

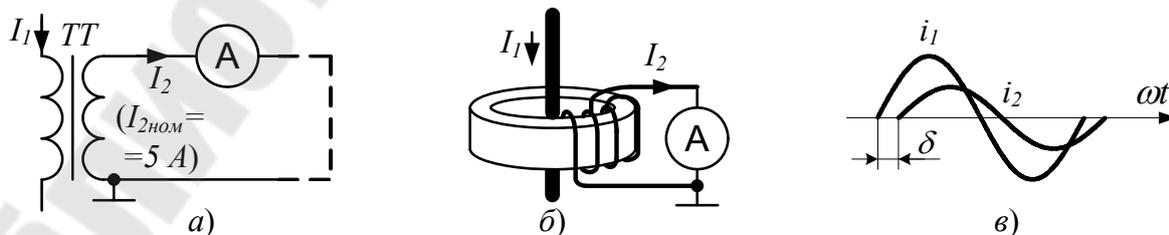


Рисунок 1.25 - Включение трансформатора тока (а), проходной трансформатор тока (б) и угловая погрешность (в)

Следует отметить, что размыкание цепи вторичной обмотки трансформатора тока недопустимо. В этом случае трансформатор переходит в режим холостого хода и его результирующий магнитный поток, которому не противодействует поток вторичной обмотки, резко возрастает. Это приводит к сильному возрастанию магнитных потерь в стали, и трансформатор может сгореть. Еще большую опасность представляет резкое повышение напряжения на зажимах вторичной обмотки до нескольких сот и даже тысяч вольт. Для предотвращения режима холостого хода при отключении приборов следует замыкать вторичную обмотку трансформатора тока накоротко.

### **Вопросы и задания**

1. В каких случаях применяют измерительные трансформаторы напряжения и тока?
2. Поясните схему включения трансформатора напряжения. Какие погрешности существуют и как их минимизировать?
3. Поясните схему включения трансформатора тока. Какие погрешности существуют и как их минимизировать?
4. Почему нельзя оставлять трансформатор тока с разомкнутой вторичной обмоткой?

## 2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1 Устройство и принцип действия трехфазного АД

Устройство асинхронного двигателя (АД). АД имеет статор и ротор, разделенные воздушным зазором (рис. 2.1). Активными частями ее являются магнитопровод и обмотки. Все остальные части являются конструктивными.

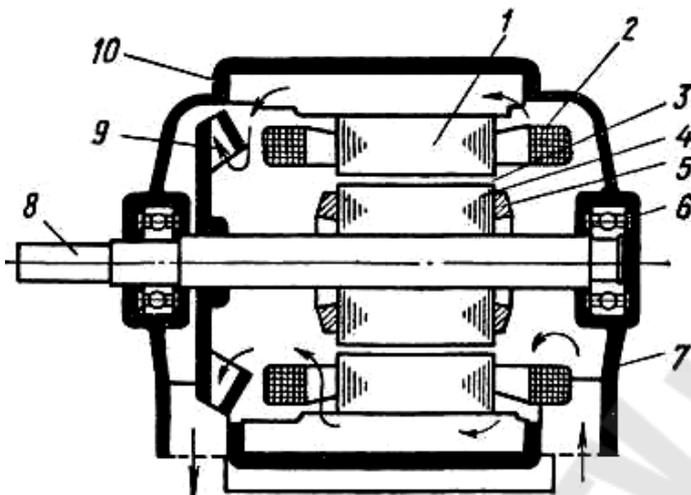


Рисунок 2.1 - Конструктивная схема АД: 1 - статор, 2 - обмотка статора, 3 - воздушный зазор, 4 - ротор, 5 - обмотка ротора, 6 - подшипники, 7 - щитки, 8 - вал, 9 - вентилятор, 10 - станина

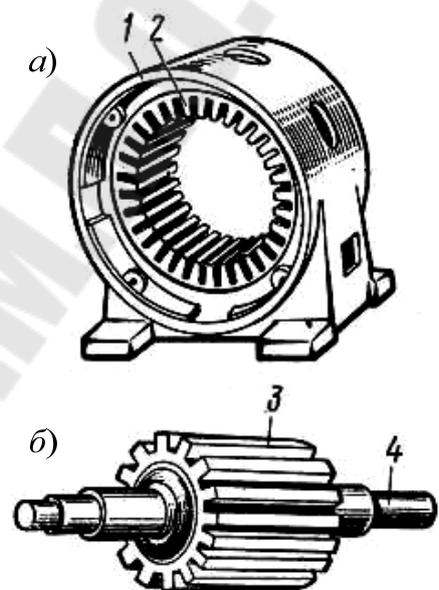


Рисунок 2.2 - Устройство статора (а) и ротора (б): 1 - станина, 2 - пакет статора и 3 - ротора, 4 - вал

Магнитопровод АД выполняют шихтованным из листов электротехнической стали. По магнитопроводу замыкается переменный магнитный поток, создаваемый токами обмоток АД. Статор АД запрессован в литую станину (рис. 2.2, а), изготовленную либо из алюминия, либо из чугуна. В пазах на внутренней поверхности шихтованного статора располагают трехфазную обмотку. Назначение обмотки статора – создание вращающегося магнитного поля статора  $\Phi_{cm}$ . Ротор АД состоит из сердечника (рис. 2.2, б), напрессованного на вал. В пазы ротора укладывают обмотку либо в виде проволочных катушек, либо в виде стержней с замыкающими по торцам кольцами (типа «беличье колесо»).

Принцип действия трехфазного АД. Рассмотрим один короткозамкнутый виток ротора, помещенный во вращающееся магнитное поле статора (рис. 2.3). Поле статора  $\Phi_{cm}$  вращается с частотой  $\omega_0$ , ротор вращается с

частотой  $\omega$ . В зависимости от соотношения между частотами  $\omega_0$  и  $\omega$  АД может работать либо в режиме двигателя, либо в режиме тормоза.

Двигательный режим работы возникает тогда, ротор вращается в ту же сторону, что и поле статора  $\Phi_{ст}$ , причем ротор вращается медленнее:  $\omega < \omega_0$ . (рис. 2.3, а). Пусть поле  $\Phi_{ст}$  чуть повернулось относительно ротора. Тогда количество линий магнитного потока статора  $\Phi_{ст}$ , пронизывающих контур ротора, увеличится. В контуре ротора возникнет индукционная ЭДС  $e$ , и так как контур короткозамкнутый, то в нём потечет индукционный ток  $i_{инд}$ . Индукционный ток  $i_{инд}$  создаст индукционное магнитное поле  $\Phi_{инд}$  контура. Направление потока  $\Phi_{инд}$ , определенное по правилу Ленца, будет такими, каким показано на (рис. 2.3, а). Зная направление индукционного потока  $\Phi_{инд}$ , используя правило буравчика, находим индукционный ток  $i_{инд}$ . Взаимодействие индукционного тока  $i_{инд}$  с магнитным полем статора  $\Phi_{ст}$  создаст механическую силу  $F$ , действующие на стороны короткозамкнутой рамки ротора. Направления сил  $F$ , определенных по правилу левой руки, будет совпадающим с направлением вращения ротора.

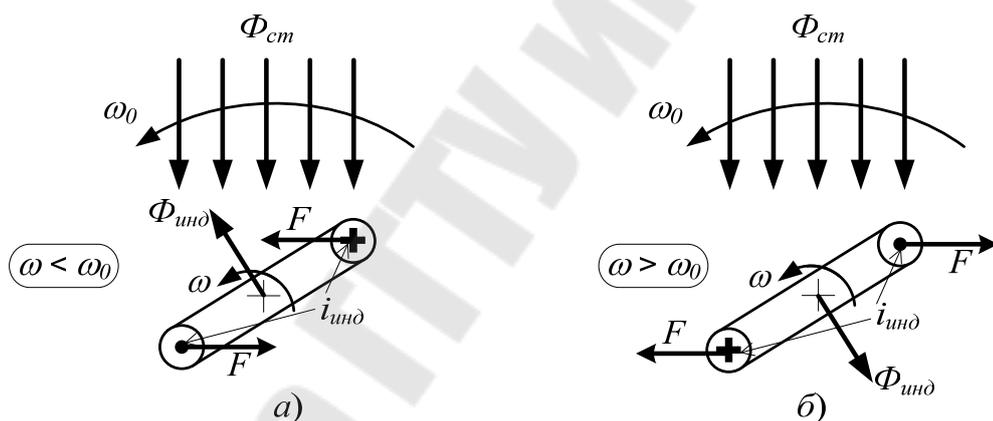


Рисунок 2.3 – Работа АД в двигательном (а) и тормозном (б) режимах

Тормозной режим работы возникает тогда, когда ротор вращается в ту же сторону, что и поле статора  $\Phi_{ст}$ , но ротор вращается быстрее:  $\omega > \omega_0$ . (рис. 2.3, б). При малейшем повороте ротора относительно поля  $\Phi_{ст}$  количество линий магнитного потока статора  $\Phi_{ст}$ , пронизывающих контур ротора, уменьшится. Далее, повторяя все рассуждения, примененные к рис. 2.3, а, находим, что силы  $F$  будут направлены навстречу направлению вращения ротора.

Из вышеприведенного вытекает важная закономерность: независимо от режима работы АД и, соответственно, от соотношения между частотами  $\omega_0$  и  $\omega$ , ротор стремится вращаться с одинаковой частотой с полем статора  $\Phi_{ст}$ . Однако полного совпадения частот  $\omega_0$  и  $\omega$  не будет никогда. Для доказательства этого, предположим, что частоты вращения  $\omega_0$  и  $\omega$  совпадут.

Тогда поле статора  $\Phi_{cm}$  для любого короткозамкнутого витка ротора будет неизменным. Если не будет изменения магнитного потока, пронизывающего контур ротора, то не будет индукционной ЭДС  $e$  и, далее, не будет индукционного тока  $i_{инд}$ . Значит, не будет механической силы  $F$ , приложенной к ротору. Ротор в двигательном режиме затормозится силами трения в подшипниках, аэродинамической силой вентилятора и т.п. Частота вращения ротора  $\omega$  понизится. Вновь появятся механические силы  $F$ , действующие на ротор и заставляющие его вращаться без дальнейшего понижения частоты вращения  $\omega$ . В тормозном режиме внешние силы, заставляющие ротор вращаться быстрее поля  $\Phi_{cm}$ , разгонят его до частоты  $\omega$ , превышающей  $\omega_0$ . Значит, ротор АД вращается не синхронно с полем статора и это объясняет название двигателя как асинхронного.

### Вопросы и задания

1. Поясните устройство АД.
2. Поясните принцип действия АД.
3. Почему двигатель называется асинхронным?

### 2.2 Работа заторможенного АД при разомкнутом и замкнутом роторе

Режим работы АД при заторможенном роторе наиболее прост для анализа, так как обмотки статора и ротора пересекаются вращающимся магнитным потоком статора  $\Phi_{cm}$  с одной и той же скоростью и, следовательно, частоты ЭДС статора  $f_1$  и ротора  $f_2$  одинаковые:

$$\begin{cases} E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_{cm}, \\ E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{cm}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $w_1, w_2$  – количество витков обмотки статора и ротора;  $k_{об1}, k_{об2}$  – обмоточные коэффициенты, учитывающие распределение обмоток по пазам,  $k_{об2} \approx k_{об1} = 0,9 \dots 0,96$ .

При разомкнутом роторе ток в роторе отсутствует и АД подобен трансформатору, работающему в режиме холостого хода. Уравнение статора АД имеет вид

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = R_1 \dot{I}_1 + jx_{1p} \dot{I}_1.$$

При замкнутом заторможенном роторе в нем будет ток, но ротор, удерживаемый посторонней силой, не будет вращаться. АД в этом случае

подобен трансформатору, работающему в режиме короткого замыкания. Уравнение статора АД имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + jx_{1p} \dot{I}_1, \\ \dot{E}'_2 &= R'_2 \dot{I}'_2 + jx'_{2p} \dot{I}'_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + \dot{I}'_2. \end{aligned} \quad (2.2)$$

### Вопросы и задания

1. Поясните причину индуцирования ЭДС в обмотках статора и ротора.
2. Каковы уравнения заторможенного АД при разомкнутом и замкнутом роторе?

## 2.3 Работа вращающегося АД. Параметры ЭДС и тока ротора. Энергетическая диаграмма и вращающий момент АД

### *Работа вращающегося АД. Параметры ЭДС и тока ротора.*

Введем систему обозначений, преимущественно используемую в теории АД:

- $f_1$  или  $\omega_1$  – электрическая частота питающего статор напряжения;
- $f_0$ ,  $\omega_0$  или  $n_0$  – механическая частота вращения магнитного поля статора, связанные между собой формулами

$$\omega_0 = 2\pi f_0, \quad n_0 = 60 f_0, \quad \omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} \quad (2.3)$$

- $f_2$  или  $\omega_2$  – электрическая частота тока, напряжения и ЭДС в роторе;
- $f$ ,  $\omega$  или  $n$  – механическая частота вращения ротора (вала АД), которые связаны между собою тремя формулами типа (2.3).

Электрическая и механическая частоты, относящиеся к статору, связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{f_1}{p_{\Pi}} \quad \text{или} \quad \omega_0 = \frac{\omega_1}{p_{\Pi}} \quad \Rightarrow \\ \Rightarrow f_1 &= p_{\Pi} f_0 \quad \text{или} \quad \omega_1 = \omega_0 p_{\Pi}. \end{aligned}$$

Как следует из принципа действия АД (рис. 2.3), ротор вращается в ту же сторону, что и поле статора. Если  $\omega_0$  и  $\omega$  являются механическими частотами вращения, соответственно, поля статора и ротора, то механическая частота вращения пересечений полем статора обмоток ротора будет равна разности названных частот:  $\omega_0 - \omega$  или  $f_0 - f$ .

В роторе, имеющем обмотку с тем же числом пар полюсов  $p_{II}$  как и у статора, индуцируется ЭДС  $E_2$  и создается ток  $I_2$  с электрической частотой:

$$\begin{aligned}\omega_2 &= (\omega_0 - \omega)p_{II} = \omega_1 - \omega \cdot p_{II} \quad \text{или} \\ f_2 &= (f_0 - f)p_{II} = f_1 - f \cdot p_{II}.\end{aligned}\quad (2.4)$$

Числовой характеристикой относительной механической частоты является скольжение:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_2}{\omega_0 p_{II}} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad \text{откуда} \quad \omega = \omega_0(1 - s) \quad \text{и} \quad \omega_2 = \omega_1 s. \quad (2.5)$$

Выражения ЭДС статора и ротора (2.1) с учетом последнего равенства ряда (2.5) для вращающегося АД примут вид:

$$\begin{cases} E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_{cm}, \\ E_{2s} = 4,44 f_1 s w_2 k_{об2} \Phi_{cm} \end{cases} \quad \begin{cases} E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_{cm}, \\ E_{2s} = E_2 s, \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} \Phi_{cm}$  – ЭДС неподвижного ротора (при скольжении  $s=1$ , когда в соответствии со средней формулой ряда (2.5) частота вращения АД  $\omega = \omega_0(1-s)=0$ ).

### ***Энергетическая диаграмма и вращающий момент АД***

АД, подключенный к сети, потребляет из нее активную электрическую мощность  $P_1$ , вращает ротор, отдавая механическую мощность  $P_2$  в нагрузку. Мощность  $P_1$  больше мощности  $P_2$  на величину неизбежных потерь  $\Delta P_{ном}$ . Баланс активных мощностей в АД представим в виде энергетической диаграммы (рис. 2.4).

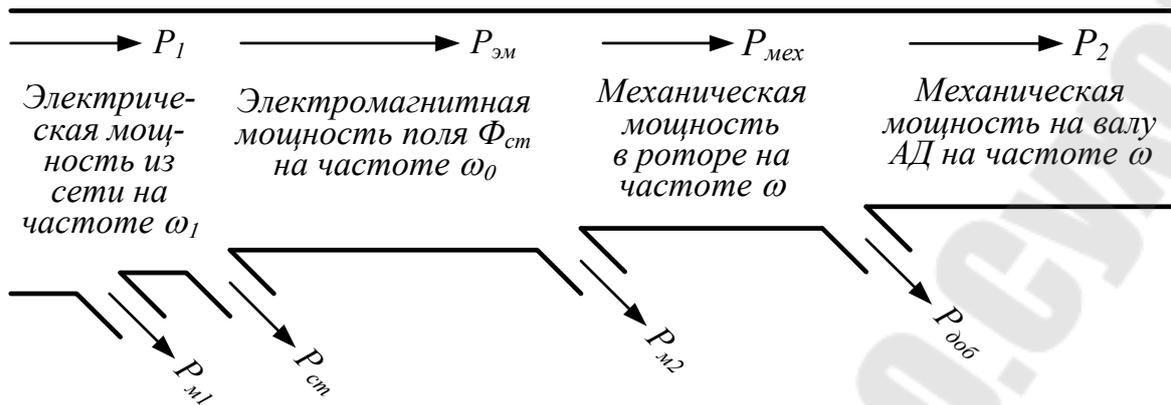


Рисунок 2.4 - Энергетическая диаграмма АД

В процессе преобразования энергии в АД возникают потери мощности в меди  $P_{м1}$  и  $P_{м2}$  (нагрев обмоток статора и ротора протекающими по ним токами), в стали  $P_{ст}$  (потери на гистерезис и вихревые токи, причем учитываются только потери в стали ротора, который перемагничивается с частотой сети  $f_1$ , а потерями в стали ротора пренебрегают из-за малой частоты  $f_2$  перемагничивания его) и добавочные потери  $P_{доб}$ , имеющие механическую природу (потери на трение в подшипниках, вентиляционные потери и т.д.).

Если пренебречь реально малыми добавочными потерями  $P_{доб}$ , то можно принять мощность  $P_2$  на валу равной механической мощности  $P_{мех}$  в роторе.

Из диаграммы могут быть рассчитаны:

1). КПД по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{м1} + P_{м2} + P_{ст} + P_{доб}}. \quad (2.7)$$

Значение КПД большинства типов АД находится в пределах 0,7...0,98.

2). Электромагнитный момент  $M$  на валу ротора, приложенный к ротору со стороны вращающегося магнитного поля статора.

В установившемся режиме работы АД (с постоянной частотой  $\omega$  вращения вала) момент, приложенный к ротору от поля статора, равен противодействующему ему моменту ротора  $M$ , который и является вращающим моментом на валу АД.

Из энергетической диаграммы следует формула

$$P_{эм} - P_{мех} = P_{м2},$$

которая с учетом соотношения  $P=M \cdot \omega$  принимает вид:

$$(\omega_0 - \omega)M = P_{M2}, \quad \text{откуда} \quad M = \frac{P_{M2}}{\omega_0 - \omega} = \frac{P_{M2}}{\omega_0 s}. \quad (2.8)$$

Вид последней формулы ряда (2.8) показывает, что вращающий момент  $M$  АД прямопропорционально связан с потерями в меди ротора  $P_{M2}$ , что открывает путь расчета механической величины  $M$  через электрическую мощность  $P_{M2}$ . В частности, если рассчитаны методами теории цепей ЭДС  $E_{2s}$ , ток  $I_2$  ротора и сдвиг по фазе  $\varphi_2$  между ними, то электрические потери  $P_{M2}$  будут равны

$$P_{M2} = E_{2s} I_2 \cos \varphi_2 = 4,44 f_1 s w_2 k_{об2} \Phi_{cm} I_2 \cos \varphi_2. \quad (2.9)$$

Подставляем (2.9) в (2.8) и получим:

$$M = \frac{P_{M2}}{\omega_0 s} = \frac{4,44 f_1 s w_2 k_{об2} \Phi_{cm} I_2 \cos \varphi_2}{\frac{2\pi f_1}{P_{II}} s} = c_M \Phi_{cm} I_2 \cos \varphi_2, \quad (2.10)$$

где  $c_M$  – конструктивная постоянная.

Формула (2.10) является универсальной и она справедлива не только для АД, но и любых других типов вращающихся электрических машин. Во всех вращающихся электрических машинах момент пропорционален произведению магнитного потока статора  $\Phi_{cm}$  на активную составляющую  $I_2 \cdot \cos \varphi_2$  тока ротора  $I_2$ .

### Вопросы и задания

1. Какие виды механических и электрических частот вращения используются в теории АД и как они между собой связаны?
2. Поясните энергетическую диаграмму АД и как из нее найти КПД?
3. Как из энергетической диаграммы найти вращающий момент АД?

### 2.4 Приведение ротора к статору. Схемы замещения АД

Расчеты рабочих характеристик АД по уравнениям его обмоток типа (2.2) слишком громоздкие, а получаемые формулы слишком сложны при использовании их в инженерной практике. Существенное упрощение расчетов и вида формул рабочих характеристик АД достигается при представлении его в виде схемы замещения приведенного АД.

В отличие от процедуры приведения вторичной обмотки трансформатора к первичной (рис. 1.3), когда частоты ЭДС и токов в обоих обмотках были одинаковыми, в приводимом к статору АД роторе отличаются не только напряжения, но и их частоты. Процедура приведения выполняется в такой последовательности: сначала приводим частоту ЭДС в роторе к статорной, а затем приводим величину ЭДС ротора к статорной ЭДС.

### **Приведение частоты ЭДС ротора к частоте ЭДС статора**

Процедура приведения иллюстрируется рис. 2.5.

В исходной схеме ротора (рис. 2.5, а) в него входит физическое активное сопротивление  $R_2$  и индуктивность рассеяния  $L_{2p}$ . К схеме приложена ЭДС  $E_{2s}$  на частоте  $\omega_2$  тока в роторе. Индуктивное сопротивление рассеяния на частоте  $\omega_2$  равно  $x_{2s} = \omega_2 L_{2p}$ .

ЭДС  $E_{2s}$  на частоте  $\omega_2$  тока в роторе, в соответствии с (2.6) равна  $sE_2$ , где  $E_2$  является ЭДС неподвижного ротора на частоте  $\omega_1$  тока в статоре. Частота  $\omega_2$  в соответствии с (2.5) равна  $s\omega_1$ .

На рис. 2.5, в обозначено индуктивное сопротивление рассеяния  $x_2$  обмотки ротора на частоте  $\omega_1$  тока в статоре, которое равно  $x_2 = \omega_1 L_{2p}$ . Сопротивления  $R_2$  неизменно при любой частоте тока в роторе, в том числе и при  $\omega_1$ .

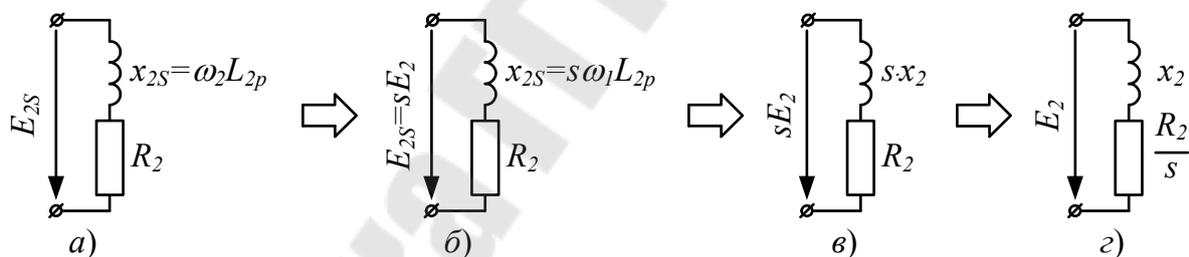


Рисунок 2.5 - Процедуры приведения ротора к статору по частоте

Схема на рис. 2.5, г, полученная делением на  $s$  всех элементов схемы рис. 2.5, в, содержит только элементы  $E_2$ ,  $x_2$  и  $R_2/s$  на частоте  $\omega_1$  тока в статоре. Приведение по частоте завершено.

### **Приведение величины ЭДС ротора $E_2$ к ЭДС $E_1$ статора**

Процедура приведения такая же, как и у трансформатора (рис. 1.3). Поэтому можно сразу составить первую полную схему замещения АД (рис. 2.6, а), аналогичную полной схеме замещения трансформатора (рис. 1.3, д).

Представим активное сопротивление вторичной обмотки следующим разложением:

$$\frac{R'_2}{s} = \frac{R'_2(s+1-s)}{s} = R'_2 + \frac{1-s}{s}R'_2. \quad (2.11)$$

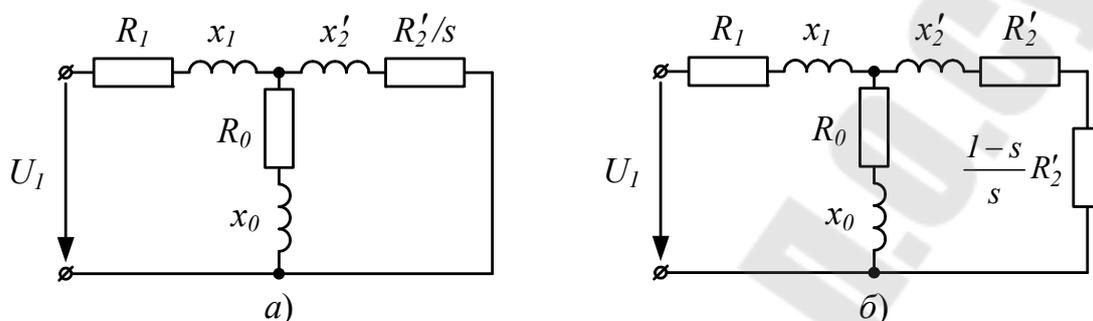


Рисунок 2.6 - Полные схемы замещения АД

В соответствии с этим разложением вычертим вторую полную схему замещения АД (рис. 2.6, б). На Т-образной части схемы содержатся только физические сопротивления  $R_1, x_1, R_0, x_0, R'_2, x'_2$  обмоток АД и цепи намагничивания. Вторичная цепь схемы замещения замкнута на фиктивное сопротивление  $\frac{1-s}{s}R'_2$ .

Проанализируем полученную схему замещения с точки зрения энергетического баланса в ней. Активная мощность  $P_1$  расходуется на реальные потери мощности в физических сопротивлениях  $R_1, R_0, R'_2$  и на выделение мощности  $P_2$  в фиктивном сопротивлении  $\frac{1-s}{s}R'_2$ . Эта мощность не является мощностью потерь и отождествляется с механической мощностью на валу АД.

Таким образом, механическая мощность на валу АД может быть формально вычислена в результате расчета схемы на рис. 1.25, б как активная мощность на фиктивном сопротивлении  $\frac{1-s}{s}R'_2$ . Однако расчеты по полной схеме замещения АД будут громоздкими, а получаемые формулы слишком сложны и неудобны в применении. Для преодоления названных вычислительных проблем допустимо вместо полной Т-образной схемы замещения АД использовать упрощенную Г-образную схему, изображенную на рис. 2.7, а.

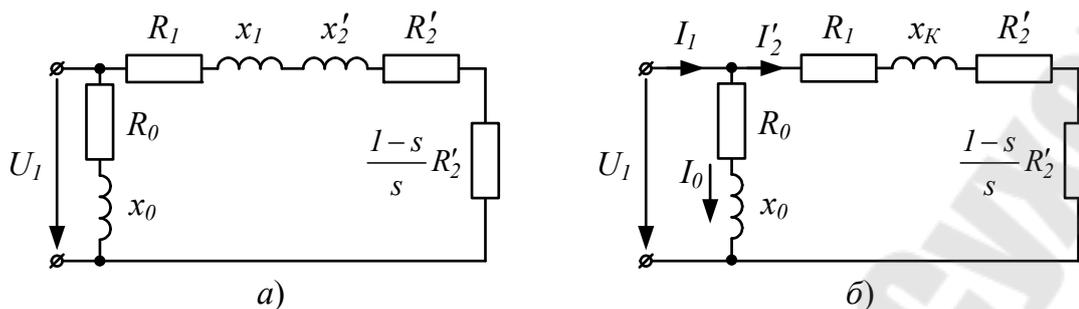


Рисунок 2.7 - Упрощенные схемы замещения АД

Погрешность в расчетах от такой замены схемы не превышает 5%, что является допустимым в инженерной практике. Следующая упрощенная схема замещения АД, приведенная на рис. 2.7, б, содержит одно индуктивное сопротивление короткого замыкания  $x_K$  вместо двух рассеяния:  $x_K = x_1 + x_2'$ . Это окончательная схема замещения АД. По ней рассчитываются все рабочие характеристики АД.

### Вопросы и задания

1. В чем состоят отличия в приведении трансформатор и АД?
2. Поясните процедуру приведения ротора к статору по частоте.
3. Поясните процедуру приведения ротора к статору по ЭДС и вид полной схемы замещения АД.
4. Поясните, как по полной схеме замещения АД рассчитать механическую мощность на валу АД?
5. Поясните приведение полной схемы замещения АД к упрощенной схеме.

## 2.5 Механическая и электромеханическая характеристики АД

Основными рабочими характеристиками АД являются электромеханическая (ЭМХ) и механическая (МХ).

ЭМХ называются зависимости тока статора АД от частоты вращения  $\omega$  вала АД или от скольжения  $s$ :

$$I_1 = f(\omega) \quad \text{или} \quad I_1 = f(s). \quad (2.12)$$

МХ называются зависимости вращающего момента АД от частоты вращения  $\omega$  вала АД или от скольжения  $s$ :

$$M = f(\omega) \quad \text{или} \quad M = f(s). \quad (2.13)$$

Формулы названных характеристик приобретают простейший вид, если используются зависимости от скольжения  $s$ .

Расчеты ЭМХ ведем по упрощенной Г-образной схеме замещения, приведенной на рис. 2.7, б.

### Расчет ЭМХ

Из схемы рассчитываем токи  $I'_2$ ,  $I_0$  и  $I_1$ :

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + jx_K} \Rightarrow I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}}, \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_1}{R_0 + jx_0}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2.$$

Выражение ЭМХ имеет вид

$$I_1 = \left| \frac{\dot{U}_1}{R_0 + jx_0} + \frac{\dot{U}_1}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + jx_K} \right|. \quad (2.15)$$

### Расчет МХ

При рассчитанном по (2.14) токе  $I'_2$  находим механическую мощность АД, приравняв ее к активной мощности, выделенной в фиктивном сопротивлении:

$$P_{\text{мех}} = \frac{1-s}{s} R'_2 I_2'^2 = \frac{(1-s)}{s} R'_2 \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + x_K^2}. \quad (2.16)$$

При частоте вращения вала, определяемой по (2.5) как  $\omega = \omega_0(1-s)$ , и с учетом трех фаз АД, вращающий момент АД рассчитываем по формуле

$$M = \frac{3P_{\text{мех}}}{\omega_0(1-s)} = \frac{3(1-s)}{\omega_0(1-s)s} R_2' \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_K^2} =$$

$$= \frac{R_2'}{\omega_0 s} \frac{3 \cdot U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_K^2} \quad (2.17)$$

Последняя формула ряда (2.17) является выражением МХ АД.

Построенные по выражениям (2.15) и (2.17) графики ЭМХ и МХ имеют вид, приведенный на рис. 2.8.

Разметка осей абсцисс  $s$  и  $\omega$  выполнена согласно выражения  $\omega = \omega_0(1-s)$ . На характеристиках кроме номинальных параметров  $I_{\text{ном}}$  и  $M_{\text{ном}}$  при номинальной (паспортной) частоте вращения  $\omega_{\text{ном}}$  отмечены пусковые значения тока  $I_{\text{п}}$  и момента  $M_{\text{п}}$ . Для АД кратность пускового тока  $k_I = I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$  составляет 5...7. Для АД с одноклеточным короткозамкнутым ротором кратность пускового момента  $k_M = M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$  составляет 0,5...0,9, а для АД с двухклеточным и глубокопазым ротором  $k_M = 1,2...1,6$ .

На графике МХ имеется точка с максимальным моментом, который называется критическим моментом  $M_K$ . Кратность критического момента  $\lambda = M_K/M_{\text{ном}}$  составляет для АД величину  $\lambda = 1,7..3,0$ . Скольжение  $s_K$  и частота  $\omega_K$  соответствующие критическому моменту  $M_K$ , называются критическими. Величина  $\lambda$  является характеристикой перегрузочной способности АД.

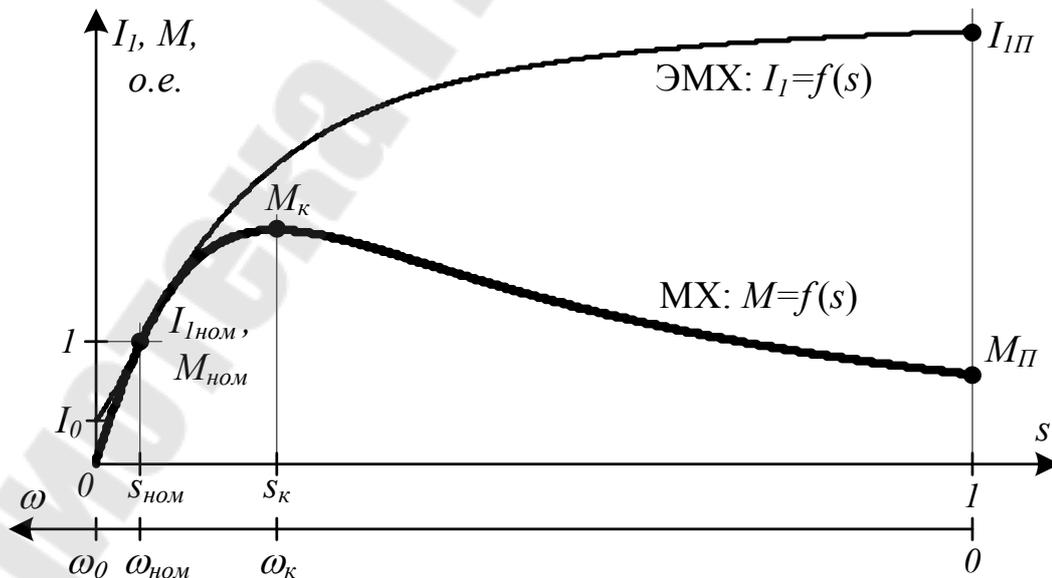


Рисунок 2.8 - Электромеханическая (ЭМХ) и механическая (МХ) характеристики АД

Типовые значения частот и скольжений для особых точек равны:

$$\begin{aligned} s_{ном} &= 0,02...0,06, & s_k &= 0,06...0,15, \\ \omega_{ном} &= 0,94...0,98 \text{ о.е.}, & \omega_k &= 0,85...0,94 \text{ о.е.} \end{aligned} \quad (2.18)$$

### Вопросы и задания

1. Дайте формулировки электромеханической и механической характеристикам АД.
2. Приведите расчет ЭМХ по упрощенной схеме замещения АД.
3. Приведите расчет МХ по упрощенной схеме замещения АД.
4. Какие особые точки имеются на графиках ЭМХ и МХ и каковы их числовые значения?

### 2.6 Упрощенная и полная формулы Клосса АД

Для расчета МХ по формуле (2.17) нужны сопротивления обмоток АД. Однако указанные сопротивления редко приводятся в каталожных данных АД и никогда не выносятся на шильдик (этикетку), прикрепленный к корпусу двигателя. Такое положение с расчетами МХ АД объясняется тем, что МХ может быть просто рассчитана по значениям в особых точках МХ, а именно:

- по номинальным значениям вращающего момента  $M_{ном}$  и частоты  $\omega_{ном}$  (фактически задаются номинальная мощность  $P_{ном}$  и номинальная частота  $n_{ном}$ , но которые просто пересчитываются в  $M_{ном}$  и  $\omega_{ном}$  по формулам:

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} \text{ и } M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}};$$

- и по перегрузочной способности  $\lambda$ .

Такие формулы расчета МХ называются формулами Клосса. Существуют упрощенная и полная формулы Клосса.

#### **Вывод упрощенной формулы Клосса**

Для вывода используется выражение МХ в виде (2.17), но в котором принято  $R_l=0$ . Такое упрощение формулы (2.17) обосновывается следующим:

- величины сопротивлений  $R_l$  малы и практически одинаковые;
- диапазон рабочих скольжений АД, работающего без перегрузки, не превышает значения (2.18) и поэтому  $1/s=17...50 \gg 1$ ;

- в сумме  $\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)$  первое слагаемое  $R_1$  намного меньше второго, поэтому сопротивлением  $R_1$  можно пренебречь.

Выражение (2.17) МХ АД примет вид

$$M = \frac{R'_2}{\omega_0 s} \frac{3U_1^2}{\frac{R_2'^2}{s^2} + x_K^2} = \frac{3R'_2 U_1^2}{\omega_0 \left(\frac{R_2'^2}{s} + x_K^2 s\right)}. \quad (2.19)$$

Момент  $M$  принимает максимальное (критическое) значение  $M_\kappa$  при таком скольжении  $s$ , когда знаменатель выражения (2.19) будет минимальным. Условием минимума названного знаменателя является равенство нулю производной от него по скольжению  $s$ :

$$\left(\frac{R_2'^2}{s} + x_K^2 s\right)' = -\frac{R_2'^2}{s^2} + x_K^2 \Rightarrow s_\kappa = \frac{R'_2}{x_K}. \quad (2.20)$$

Подставляем  $s_\kappa$  из (2.20) в формулу (2.19) и рассчитываем  $M_\kappa$ :

$$M_\kappa = \frac{3R'_2 U_1^2}{\omega_0 \left(R_2'^2 \frac{x_K}{R'_2} + x_K^2 \frac{R'_2}{x_K}\right)} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 x_K}. \quad (2.21)$$

Представляем выражение (2.19) в виде, допускающем применение к нему подстановки (2.21) и выполняем преобразования:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3R'_2 U_1^2}{\omega_0 \left(\frac{R_2'^2}{s} + x_K^2 s\right)} = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 x_K} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2x_K R'_2} \left(\frac{R_2'^2}{s} + x_K^2 s\right)} = \\ &= \frac{2M_\kappa}{\frac{R'_2}{x_K s} + \frac{x_K}{R'_2}} = \frac{2M_\kappa}{\frac{s_\kappa}{s} + \frac{s}{s_\kappa}}, \quad \text{где } s_\kappa = \frac{R'_2}{x_K} \text{ по (2.32)}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Последнее выражение ряда (2.22) является упрощенной формулой Клосса.

Критическое скольжение  $s_k$  не является каталожной величиной, но оно может быть найдено из формулы (2.22), если в правую часть ее подставить номинальное скольжение  $s_{ном}$ , а в левую – номинальный момент  $M_{ном}$ :

$$M_{ном} = \frac{2M_k}{\frac{s_k + s_{ном}}{s_{ном} s_k}} \Rightarrow M_{ном} = \frac{2\lambda M_{ном}}{\frac{s_k + s_{ном}}{s_{ном} s_k}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{s_k + s_{ном}}{s_{ном} s_k} = 2\lambda \Rightarrow s_k^2 - 2\lambda s_{ном} s_k + s_{ном}^2 = 0 \Rightarrow (2.23)$$

$$\Rightarrow s_k^2 - 2\lambda s_{ном} s_k + s_{ном}^2 = 0 \Rightarrow s_k = s_{ном} \left( \lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right).$$

Упрощенная формула Клосса достаточно точна на участке от критической  $\omega_k$  частоты вращения АД до синхронной частоты  $\omega_0$  (рис. 2.8). Однако на разгонном участке МХ от нулевой частоты  $\omega$  до критической  $\omega_k$  формула даёт значительную погрешность.

### **Полная формула Клосса**

При выводе полной формулы Клосса используется выражение МХ (2.17) без каких-либо упрощений. Полная формула Клосса имеет вид

$$M = \frac{M_k (2 + a \cdot s_k)}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k} + a \cdot s_k}, \quad (2.24)$$

где  $a = \frac{2R_1}{(1,02 \dots 1,06)R_2'}$ .

### **Вопросы и задания**

1. Приведите выражения упрощенной и полной формулы Клосса.
2. Как рассчитать критическое скольжение и момент через параметры обмоток АД?
3. Как рассчитать критический момент через каталожные данные АД?

### **2.7 Устойчивости работы АД «в малом» и «в большом»**

Под устойчивостью работы электродвигателя понимают способность двигателя восстанавливать установившуюся частоту вращения при кратко-

временных возмущениях (изменениях нагрузки, напряжения питающей сети и пр.).

При анализе устойчивости используется уравнение механики

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_C \quad \text{или} \quad J\dot{\omega} = M - M_C, \quad (2.25)$$

где  $J$  – момент инерции нагрузки;

$M_C$  – момент сопротивления нагрузки;

$M$  и  $\omega$  – вращающий момент и частота вращения АД.

Из уравнения механики следует:

- если  $M > M_C$ , то и частота вращения двигателя увеличивается;

- если  $M < M_C$ , то и частота вращения двигателя уменьшается;

- если  $M = M_C$ , то и двигатель работает в установившемся режиме.

Работу нагруженного АД удобно анализировать графическим методом с использованием механических характеристик АД и нагрузки (рис. 2.18). Тогда установившемуся режимам соответствуют точки пересечения графиков.

Различают устойчивость работы «в малом» и «в большом».

#### ***Устойчивость работы АД «в малом»***

Устойчивость работы «в малом» устанавливается для режимов с малыми отклонениями от установившегося режима (рис. 2.9, а).

Механические характеристики АД и нагрузки пересекаются в точках 1 и 2 и только в них, в соответствии с (2.25), могут быть установившиеся режимы. Однако, существование точек пересечения еще не достаточно для их устойчивости. Необходимо еще учитывать наклоны МХ в точках их пересечения.

Исследуем на устойчивость точку 1. Пусть случайно частота вращения АД увеличилась, стала больше  $\omega_1$  и ей на графиках МХ соответствуют точки 3' и 3". Вращающий момент  $M$  АД, определяемый точкой 3', будет меньше момента сопротивления  $M_C$  нагрузки, определяемого точкой 3", и, поэтому, частота вращения АД будет снижаться до тех пор, пока будет достигнута точка 1. Теперь пусть случайно частота вращения АД уменьшилась, стала меньше  $\omega_1$  и ей на графиках МХ соответствуют точки 4' и 4". Вращающий момент  $M$  АД, определяемый точкой 4', будет больше момента сопротивления  $M_C$  нагрузки, определяемого точкой 4", и, поэтому, частота вращения АД будет увеличиваться до тех пор, пока будет достигнута точка 1. Таким образом, точка 1 является устойчивой точкой установившегося режима работы АД.

Исследуем теперь на устойчивость точку 2. Пусть случайно частота вращения АД увеличилась, стала больше  $\omega_2$  и ей на графиках МХ соответствуют точки 5' и 5". Вращающий момент  $M$  АД, определяемый точкой 5', будет больше момента сопротивления  $M_C$  нагрузки, определяемого точкой 5", и, поэтому, частота вращения АД будет повышаться до тех пор, пока будет достигнута точка 1. Теперь пусть случайно частота вращения АД уменьшилась, стала меньше  $\omega_2$  и ей на графиках МХ соответствуют точки 6' и 6". Вращающий момент  $M$  АД, определяемый точкой 6', будет меньше момента сопротивления  $M_C$  нагрузки, определяемого точкой 4", и, поэтому, частота вращения АД будет уменьшаться до тех пор, пока двигатель остановится. Таким образом, точка 2 является неустойчивой точкой установившегося режима работы АД.

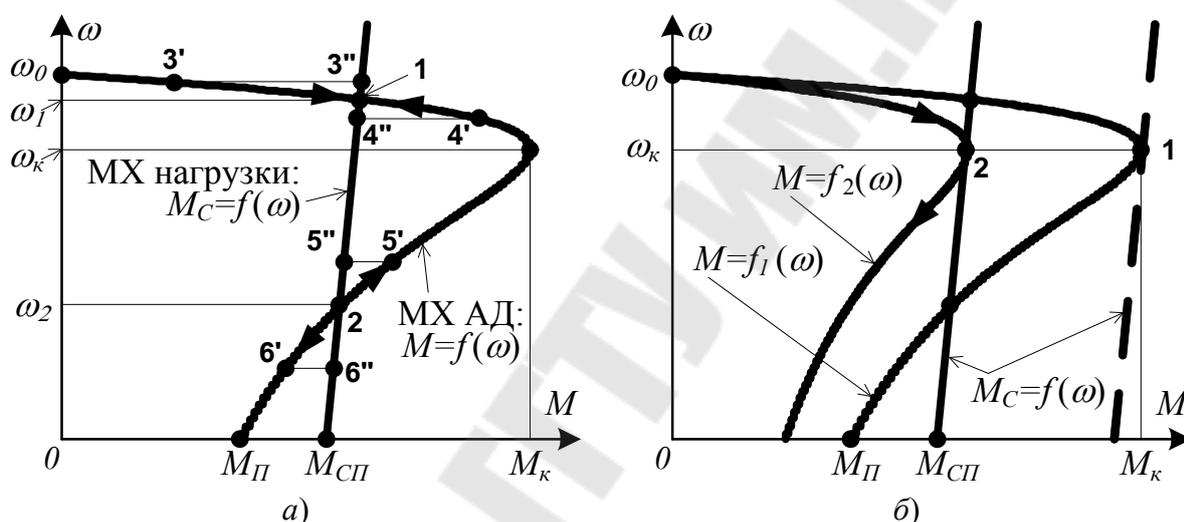


Рисунок 2.9 - МХ двигателя ( $M$ ) и нагрузки ( $M_C$ ), иллюстрирующие устойчивость «в малом» (а) и «в большом» (б).

Условие устойчивости в точке 1 может быть записано в аналитической форме в виде неравенства, полученного из линеаризованного уравнения (2.25) для малых отклонений частоты  $\Delta\omega$ :

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\partial M}{\partial \omega} \Delta\omega - \frac{\partial M_C}{\partial \omega} \Delta\omega \Rightarrow \left[ Jp + \left( \frac{\partial M_C}{\partial \omega} - \frac{\partial M}{\partial \omega} \right) \right] \Delta\omega = 0. \quad (2.26)$$

Линеаризованное уравнение механики оказалось операторным уравнением первого порядка. По критерию устойчивости Гурвица система первого порядка будет устойчива, если положительны оба коэффициента операторного уравнения, т.е.

$$\begin{cases} J > 0, \\ \left( \frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M}{\partial \omega} \right) > 0 \end{cases} \Rightarrow \frac{\partial M_c}{\partial \omega} > \frac{\partial M}{\partial \omega}. \quad (2.27)$$

В точке 1 неравенство (2.27) выполняется, а в точке 2 – нет.

Устойчивым рабочим участком МХ АД является участок с частотой вращения, превышающей критическую частоту  $\omega_k$ , а на частотах ниже критической  $\omega_k$  работа АД неустойчива. Неустойчивый участок называется разгонным участком АД. Условием разгона двигателя является превышение моментом АД момента сопротивления нагрузки на протяжении всего разгонного участка.

### **Устойчивость работы АД «в большом»**

Устойчивость работы «в большом» устанавливается для режимов с большими отклонениями от установившегося режима (рис. 2.9, б). К большим изменениям относятся:

- глубокое понижение напряжения питания АД, переводящие естественную МХ  $M=f_1(\omega)$  в такую искусственную  $M=f_2(\omega)$ , которая с МХ нагрузки  $M_c=f(\omega)$  не пересекается, что приведет к остановке АД;
- большое увеличение момента сопротивления нагрузки, так что график МХ нагрузки, показанный пунктиром, не будет пересекать МХ АД и двигатель остановится.

### **Вопросы и задания**

1. Как с помощью уравнения механики вращательного движения можно судить об устойчивости работы нагруженного АД?
2. Как доказать устойчивость работы «в малом» на рабочем участке МХ АД?
3. Как доказать неустойчивость работы «в малом» на разгонном участке МХ АД?
4. Что такое устойчивость работы АД «в большом»?

## **2.8 Устройство и принцип действия АД с двухклеточным и глубокопазым ротором**

Основным недостатком рассмотренной ранее конструкции АД, у которого ротор состоит из стержней круглого сечения (рис. 2.3), является малый пусковой момент  $M_{II}$  (рис. 2.8). Это недостаток приводит к тому, что АД невозможно разогнать, если момент сопротивления нагрузки на раз-

гонном участке МХ АД (рис. 2.9) близок к номинальному. К нагрузкам с таким моментом сопротивления относят грузоподъемные устройства, компрессоры, конвейеры и др.

В настоящее время АД такой конструкции не изготавливаются, а изготавливаются АД с двухклеточным и глубокопазым ротором. В последних пусковой момент существенно выше и намного превышает номинальный момент. Поэтому привода с такими АД могут разогнаться при любой допустимой по моменту нагрузке и даже при пониженном на 10...15% напряжении питания АД, что часто и случается в судовых сетях с ограниченной мощностью электростанции.

### ***Устройство и принцип действия АД с двухклеточным ротором***

Схема расположения стержней двух короткозамкнутых клеток ротора и их сечения приведены на рис. 2.10. Верхняя, ближе расположенная к зазору клетка называется пусковой (индекс «П» в обозначениях сопротивлений и т.п.), а нижняя, далее отстоящая от зазора клетка называется рабочей (индекс «Р» в обозначениях сопротивлений и т.п.)

На МХ двухклеточного АД влияют следующие особенности:

1. Соотношение между активными сопротивлениями стержней клеток. Рабочая клетка состоит из стержней большого диаметра и имеет малое активное сопротивление  $R_{PM}$ . Пусковая клетка состоит из стержней малого диаметра и имеет большое активное сопротивление  $R_{PB}$ .

2. Соотношение между индуктивностями рассеяния стержней ротора. С стержнем пусковой обмотки связано малое число линий магнитного поля рассеяния  $\Phi_{rPM}$  (линии полей рассеяния стержня ротора – это линии, не достигающие статора). Поэтому индуктивность рассеяния верхнего стержня представляет малую величину  $L_{rPM}$ . С нижним, далеко отстоящим от статора стержнем рабочей обмотки связано большое число линий магнитного поля рассеяния  $\Phi_{rPB}$ . Поэтому индуктивность рассеяния нижнего стержня большая  $L_{rPB}$ .

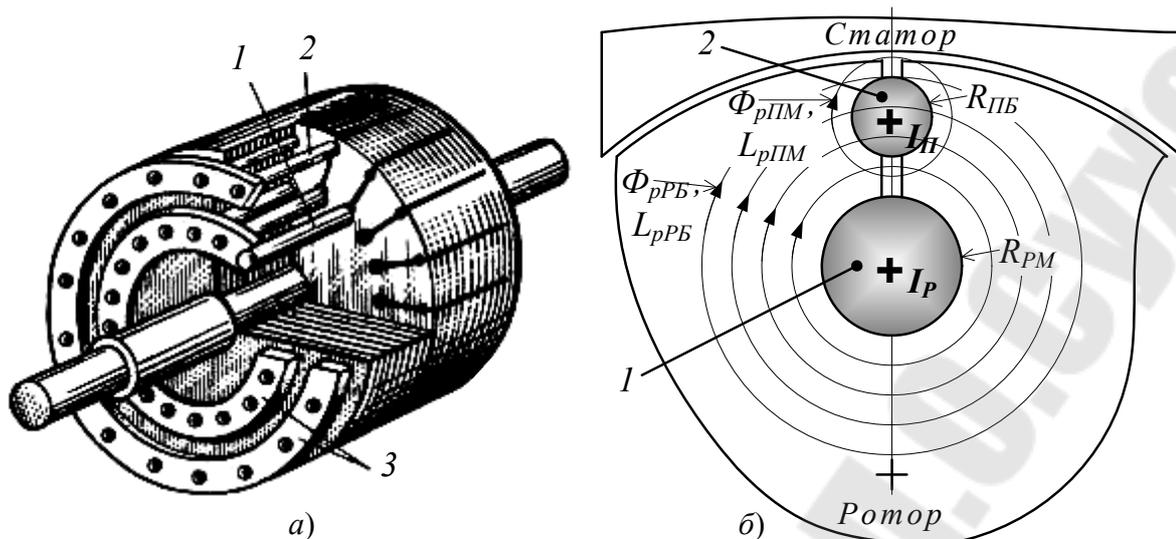


Рисунок 2.10 - Общий вид (а) и разрез паза (б) ротора двухклеточного АД:  
 1 и 2 - рабочая и пусковая клетки, 3 - короткозамыкающие кольца

3. Изменение частоты тока в роторе в процессе разгона АД. В процессе разгона АД частота  $\omega_2$  тока в роторе изменяется от максимальной, равной сетевой  $\omega_1$ , до малой частоты  $\omega_2 = s\omega_1$ , определяемой по формуле (2.5), причем скольжение на рабочем участке МХ АД лежит в пределах от  $s_{ном. max} = 0,06$  до 0. Здесь почти двадцатикратное снижение частоты  $\omega_2$  тока в роторе.

4. Клетки ротора включены между собой параллельно (рис. 2.10, б). Это значит, что напряжения на стержнях обеих клеток совпадают, а токи  $I_{\Pi}$  и  $I_P$  в клетках распределяются обратно пропорционально их полным сопротивлениям  $z_{\Pi}$  и  $z_P$ :

$$\frac{I_{\Pi}}{I_P} = \frac{z_P}{z_{\Pi}} = \frac{\sqrt{R_{PM}^2 + (\omega_2 L_{pPB})^2}}{\sqrt{R_{PB}^2 + (\omega_2 L_{pPI})^2}}. \quad (2.28)$$

При пуске, когда частота  $\omega_2$  тока в роторе максимальная и равна  $\omega_1$ , когда индуктивные составляющие  $\omega L_P$  полных сопротивлений  $z$  являются преобладающими, их активными сопротивлениями  $R$  можно пренебречь и распределение токов в обмотках согласно (2.28) будет следующим:

$$\left( \frac{I_{\Pi}}{I_P} \right)_{пуск} \approx \frac{L_{pPB}}{L_{pPI}} \gg 1 \Rightarrow I_{\Pi} \gg I_P. \quad (2.29)$$

Значит, при пуске АД ток в роторе протекает преимущественно по верхней обмотке, которая и называется пусковой.

После завершения разгона и выхода на рабочий участок МХ частота  $\omega_2$  тока в роторе минимальная и равна  $(0...0,06)\omega_1$ , индуктивные составляющие  $\omega L_P$  полных сопротивлений  $Z$  являются очень малыми, ими можно пренебречь и распределение токов в обмотках согласно (2.28) будет следующим:

$$\left( \frac{I_{\Pi}}{I_P} \right)_{\text{раб}} \approx \frac{R_{PM}}{R_{ПБ}} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad I_P \gg I_{\Pi} \quad (2.30)$$

Значит, в установившемся режиме работы АД ток в роторе протекает преимущественно по нижней обмотке, которая и называется рабочей.

Таким образом, в рассматриваемом двигателе ток в начальный момент пуска вытесняется в наружную пусковую клетку, а по окончании процесса пуска протекает по рабочей клетке с малым активным сопротивлением, вследствие чего двигатель работает с высоким моментом. По этой причине двухклеточные АД называют двигателями с вытеснением тока в роторе.

### ***Устройство и принцип действия с глубоким пазом ротора***

Принцип действия этого двигателя основан также на явлении вытеснения тока. Беличья клетка выполнена из узких медных или алюминиевых стержней (рис. 2.11), заложенных в глубокие пазы ротора, высота которых в 6...12 раз больше ширины. Такие стержни можно рассматривать как проводники, разделенные на большое число слоев. Из рис. 2.11, б видно, что «нижние» слои проводников сцеплены с большей частью потока рассеяния  $\Phi_P$ , чем «верхние», и имеют соответственно большую индуктивность.

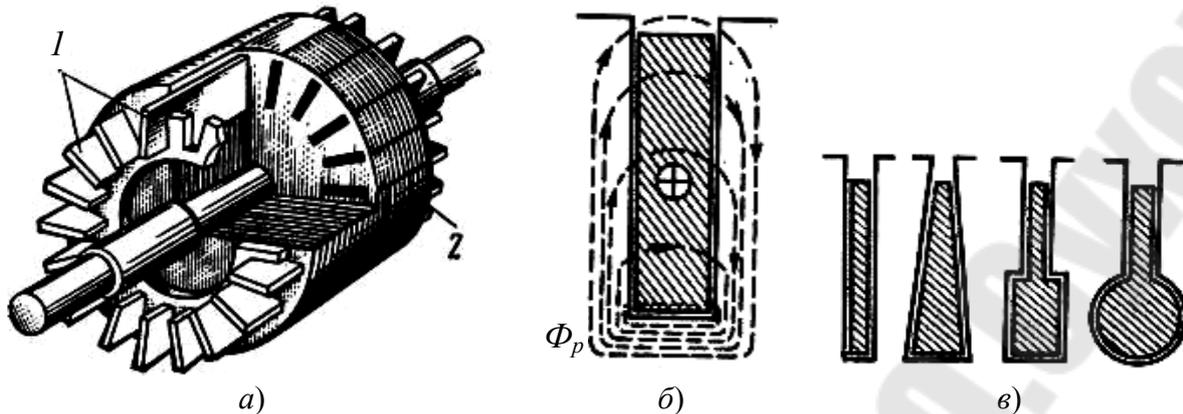


Рисунок 2.11 - Общий вид (а), разрез паза (б) глубокопазного АД и разновидности пазов (в): 1 стержни клетки, 2 - сердечник ротора

В начальный момент пуска при  $s=1$  частота изменения тока в роторе большая и распределение тока по параллельным слоям определяется в основном их индуктивным сопротивлением. Поэтому при пуске происходит вытеснение тока в верхние слои, что равносильно увеличению активного сопротивления стержня. В результате происходит повышение пускового момента двигателя. При  $s \approx s_{ном}$  частота тока в роторе мала (например, при  $f=50$  Гц и  $s=0,02$  частота  $f_2=1$  Гц) и соответственно меньше его индуктивное сопротивление. Вытеснения тока в этом случае не происходит; распределение его проходит приблизительно равномерно по высоте стержня. Стержни чаще всего выполняются бутылочной, колбообразной и трапециевидальной формы с расширением внизу (рис. 2.11, в). Поэтому в рабочем режиме ток ротора преимущественно протекает все-таки по нижней части стержня. Несмотря на несколько меньшую эффективность глубокопазного АД перед двухклеточным АД (в смысле увеличения пускового момента), глубокопазные АД производят чаще, так как проще технология изготовления ротора.

### Вопросы и задания

1. Поясните устройство и особенности работы АД с двухклеточным ротором.
2. Поясните процессы вытеснения тока в двухклеточном АД от пуска до выхода на рабочую характеристику установившегося режима.
3. Поясните устройство и принцип действия глубокопазного АД.

## 2.9 Механические характеристики АД с двухклеточным и глубокопазным ротором

В предыдущей теме рассмотрены физические процессы вытеснения тока в роторе в АД, ротор которых содержит либо две клетки круглых стержней, либо одну клетку, но с глубоким пазом. Как было отмечено, переход к таким роторным обмоткам продиктован стремлением увеличения пускового момента АД. Произведем расчет и построение МХ двухклеточного АД.

В расчетах используем:

1) упрощенную формулу Клосса (2.23)  $M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s_{\kappa}}{s} + \frac{s}{s_{\kappa}}}$ ;

2) формулу критического скольжения (2.20)  $s_{\kappa} = \frac{R'_2}{x_K}$ ;

3) формулу индуктивного сопротивления короткого замыкания АД  $x_K = x_1 + x'_2$ .

Каждая из двух клеток АД создает свой вращающий момент, зависимость которого от скольжения  $s$ , называемая МХ, имеет ряд особых точек на ее графике (рис. 2.8). Именно по особым точкам и построим МХ клеток ротора АД.

У пусковой обмотки активное сопротивление  $R_{ПБ}$  большое, а индуктивность рассеяния  $L_{ПМ}$  мала. Значит критическое скольжение  $s_{\kappa(П)}$  большое, что подтверждается расчетом:

$$s_{\kappa(П)} = \left( \frac{R'_2}{x_K} \right)_{П} = \frac{R_{ПБ}}{x_1 + x_{рПМ}} = s_{\kappaБ}. \quad (2.31)$$

График МХ  $M_{(П)(s)}$  пусковой клетки приведен на рис. 2.12, а. Обычно  $s_{\kappa(П)} > 1$ .

У рабочей обмотки активное сопротивление  $R_{ПМ}$  малое, а индуктивность рассеяния  $L_{ПБ}$  большая. Значит критическое скольжение  $s_{\kappa(Р)}$  мало, что подтверждается расчетом:

$$s_{\kappa(Р)} = \left( \frac{R'_2}{x_K} \right)_{Р} = \frac{R_{ПМ}}{x_1 + x_{рРБ}} = s_{\kappaМ}. \quad (2.32)$$

График МХ рабочей клетки приведен на рис. 2.12, а.

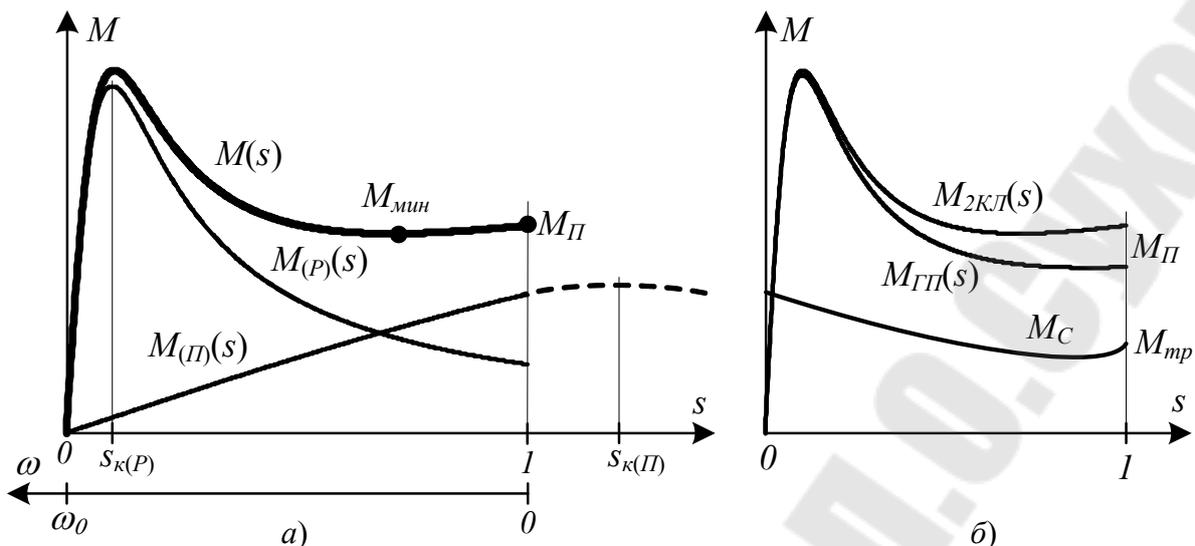


Рисунок 2.12 - МХ двухклеточного (а) и широкопазного (б) АД

Полный график МХ двухклеточного АД является суммой графиков  $M_{(II)}(s)$  и  $M_{(P)}(s)$ . Видно, что за счет значительного увеличения критического скольжения  $s_{к(II)}$  пусковой обмотки ее критический момент, как максимальный момент на графике МХ, смещен к нулевой частоте вращения АД, т.е. к пуску АД. В то же время, по мере разгона АД, вращающий момент от пусковой обмотки снижается, а вращающий момент рабочей обмотки повышается, так как у МХ рабочей обмотки критическое скольжение  $s_{к(P)}$  мало.

МХ  $M_{ГП}(s)$  широкопазного АД в принципе выглядит точно такой же, как и МХ  $M_{2КЛ}(s)$  двухклеточного АД, но проходит чуть ниже (рис. 2.12, б).

У МХ двухклеточных и широкопазных АД существует еще одна особенность – на разгонном участке графика МХ имеется участок провала небольшой продолжительности, на котором вращающий момент несколько понижается в сравнении с пусковым (рис. 2.12, а). В каталогах АД этот момент указывается как минимальный  $M_{мин}$ . Этот провал момента является следствием сложения на разгонном участке МХ АД графика падающей МХ пусковой обмотки  $M_{(II)}(s)$  и возрастающей МХ рабочей обмотки  $M_{(P)}(s)$ . Снижение момента по сравнению с пусковым  $M_{II}$  небольшое и на разгоне АД практически не сказывается. Объясняется это тем, что большинства производственных механизмов, приводимых во вращение электродвигателем, существует момент трения трогания  $M_{mp}$ , который на 10..15% превышает момент трения вращения (рис. 2.12, б).

### Вопросы и задания

1. Почему у обмоток двухклеточного АД разные критические скольжения?

2. Почему у двухклеточного АД повышенный пусковой момент?
3. Почему на МХ АД существует провал момента и опасен ли он?

### 2.10 Определение параметров двухклеточного ротора по каталожным данным АД

Формула Клосса, выведенная по схеме замещения одноклеточного ротора совершенно не пригодна для расчета МХ реальных двухклеточных и глубоко-пазных АД. Только на рабочем участке механической характеристики для частот вращения в пределах от  $\omega_{ном}$  до  $\omega_0$  формула Клосса дает удовлетворительную точность и здесь при  $s \ll s_k$  используется формула Клосса в виде

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}} \Big|_{при\ s \ll s_k} \approx \frac{2M_k}{s_k} s. \quad (2.33)$$

Для разгонного участка МХ формула Клосса совершенно не пригодна, так как значение пускового момента, рассчитанное по формуле в несколько раз меньше пускового момента, который имеют реальные двухклеточные и глубокопазные АД. Поэтому актуальна задача расчета параметров двухклеточного ротора АД по каталожным данным. Схема замещения такого АД является двухконтурной и содержит две ветви ротора (рис. 2.13). Повышению точности расчетов по представленной схеме замещения АД способствует также то, что ее основой является полная Т-образная схема замещения одноклеточного АД (рис. 2.6), которая в максимальной мере учитывает физику процессов, происходящих в АД. С целью упрощения написания формул ток статора обозначим как  $I$  (вместо  $I_1$ ), у обозначений сопротивлений ротора опустим штрихи и сопротивлениям схемы замещения второй клетки присвоим индекс «3».

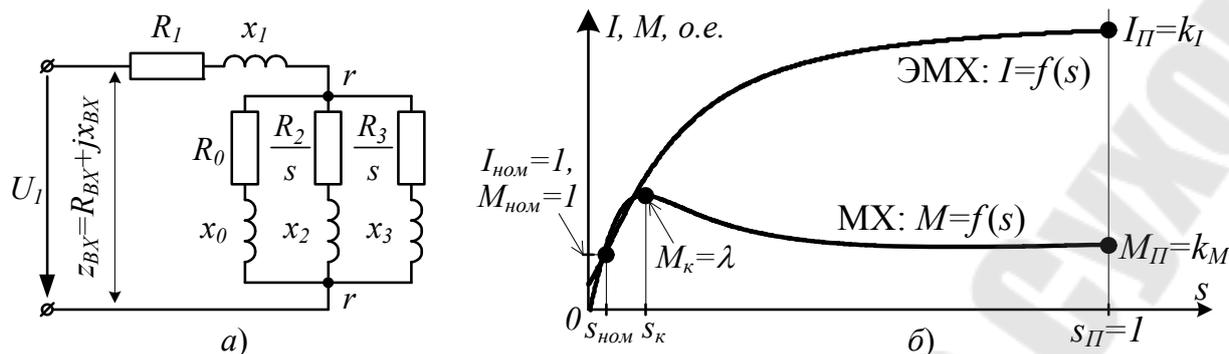


Рисунок 2.13 - Двухконтурная схема замещения АД (а), его ЭМХ и МХ (б) с нанесенными на них каталожными значениями

Исходными данными для определения сопротивлений двухконтурной схемы замещения АД являются следующие каталожные величины:

-  $P_{ном}$ ,  $U_{ном}$  и  $I_{ном}$  - номинальные значения мощности, напряжения и тока;

-  $\cos\varphi_{ном}$ ,  $\eta_{ном}$  и  $n_{ном}$  - номинальные значения коэффициента мощности, к.п.д. и частоты вращения;

-  $k_I$  - кратность пускового тока;

-  $\lambda$  и  $k_{II}$  - кратности максимального (критического) и пускового моментов.

Все расчеты ведутся в относительных единицах.

Порядок расчета:

1. Рассчитываем номинальное скольжение

$$s_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0},$$

где  $n_0$  – ближайшая к  $n_{ном}$  большая синхронная частота (табл.2.1).

Таблица 2.1 – Частоты вращения поля статора

$p_{II}$	1	2	3	4	5	6
$n_0$ , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

2. Определяем по эмпирическим формулам для статора активное сопротивление проводников обмотки и индуктивное сопротивление рассеяния:

$$R_1 = s_{ном}, \quad x_1 = \frac{1}{(2...3)k_I}.$$

3. Пренебрегаем потерями мощности в стали и, поэтому, принимаем  $R_0=0$ . Находим ток холостого хода  $I_0$ , который принимаем равным току намагничивания, и сопротивление  $x_0$  ветви намагничивания:

$$I_0 = \sin \varphi_{ном} - (\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}) \cos \varphi_{ном}, \quad x_0 = 1 / I_0 - x_1.$$

4. Определяем входное сопротивление двигателя в номинальном режиме при  $s_{ном}$ . В номинальном режиме полное входное сопротивление схемы замещения АД, выраженное в относительных единицах, будет равно единице:

$$z_{BX}^{(SH)} = \frac{U_{1.ном}^{(o.e.)}}{I_{1.ном}^{(o.e.)}} = \frac{1}{1} = 1 \text{ o.e.},$$

а его активная и реактивные составляющие

$$R_{BX}^{(SH)} = z_{BX}^{(SH)} \cos \varphi_{ном} = \cos \varphi_{ном},$$

$$x_{BX}^{(SH)} = z_{BX}^{(SH)} \sin \varphi_{ном} = \sin \varphi_{ном}.$$

Активная и реактивные составляющие входного сопротивления АД в пусковом режиме при  $s_{II}=1$ :

$$R_{BX}^{(SII)} = R_1 + \frac{\lambda \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}}{k_I^2 (1 - s_{ном})}, \quad x_{BX}^{(SII)} = \sqrt{\frac{1}{k_I^2} - (R_{BX}^{(SII)})^2}.$$

5. При найденных сопротивлениях  $R_1$ ,  $x_1$ ,  $R_{BX}$  и  $x_{BX}$  находим составляющие входного сопротивления участка  $r-r$ , состоящего из двух роторных контуров и цепи намагничивания:

$$R_{BX,rr}^{(SH)} = R_{BX}^{(SH)} - R_1, \quad x_{BX,rr}^{(SH)} = x_{BX}^{(SH)} - x_1,$$

$$R_{BX,rr}^{(SII)} = R_{BX}^{(SII)} - R_1, \quad x_{BX,rr}^{(SII)} = x_{BX}^{(SII)} - x_1.$$

Переводим сопротивления участка  $r-r$  в проводимости и, вычтя из них проводимость цепи намагничивания, вычисляем проводимости двухклеточного ротора:

- при  $s_{ном}$  :

$$g_{rH} = \frac{R_{BX}^{(SH)} - R_1}{(R_{BX}^{(SH)} - R_1)^2 + (x_{BX}^{(SH)} - x_1)^2},$$

$$b_{rH} = \frac{x_{BX}^{(SH)} - x_1}{(R_{BX}^{(SH)} - R_1)^2 + (x_{BX}^{(SH)} - x_1)^2} - \frac{1}{x_0},$$

- при  $s_{II}$  :

$$g_{rII} = \frac{R_{BX}^{(SII)} - R_1}{(R_{BX}^{(SII)} - R_1)^2 + (x_{BX}^{(SII)} - x_1)^2},$$

$$b_{rII} = \frac{x_{BX}^{(SII)} - x_1}{(R_{BX}^{(SII)} - R_1)^2 + (x_{BX}^{(SII)} - x_1)^2} - \frac{1}{x_0}.$$

6. Составляем формулы тех же проводимостей  $g_{rH}$ ,  $b_{rH}$ ,  $g_{rII}$  и  $b_{rII}$  двухклеточного ротора, но вычисленные через его сопротивления  $R_2$ ,  $x_2$ ,  $R_3$  и  $x_3$  при  $s=s_{ном}$  и  $s=s_{II}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{rH} = \frac{\frac{R_2}{s_{ном}}}{\left(\frac{R_2}{s_{ном}}\right)^2 + x_2^2} + \frac{\frac{R_3}{s_{ном}}}{\left(\frac{R_3}{s_{ном}}\right)^2 + x_3^2}, \\ b_{rH} = \frac{x_2}{\left(\frac{R_2}{s_{ном}}\right)^2 + x_2^2} + \frac{x_3}{\left(\frac{R_3}{s_{ном}}\right)^2 + x_3^2}, \\ g_{rH} = \frac{R_2}{R_2^2 + x_2^2} + \frac{R_3}{R_3^2 + x_3^2}, \\ b_{rH} = \frac{x_2}{R_2^2 + x_2^2} + \frac{x_3}{R_3^2 + x_3^2}. \end{array} \right. \quad (2.34)$$

7. Система (2.34) из четырех уравнений, содержит четыре неизвестных величины – сопротивления  $R_2$ ,  $x_2$ ,  $R_3$  и  $x_3$ . В принципе указанные сопротивления могут быть найдены в результате решения этой системы уравнений, например – численными методами решения систем нелинейных уравнений.

При найденных сопротивлениях  $R_2$ ,  $x_2$ ,  $R_3$  и  $x_3$ :

- механическая характеристика  $M(s)$  точно пройдет через две каталожные точки:  $(s_{ном}, M_{ном})$  - номинального режима и  $(1, MП)$  - пуска;

- электромеханическая характеристика  $I(s)$  точно пройдет через две каталожные точки:  $(s_{ном}, I_{ном})$  - номинального режима и  $(1, IП)$  - пуска.

8. Задавая значениями скольжения от  $s=s_{ном}$  до  $s=1$ :

8.1) рассчитываем результирующие проводимости ротора и цепи намагничивания:

$$g_s = \frac{\frac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x_2^2} + \frac{\frac{R_3}{s}}{\left(\frac{R_3}{s}\right)^2 + x_3^2}, \quad b_s = \frac{x_2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x_2^2} + \frac{x_3}{\left(\frac{R_3}{s}\right)^2 + x_3^2} + \frac{1}{x_m};$$

8.2) рассчитываем входные сопротивления двигателя:

$$R_{BX} = R_1 + \frac{g_s}{g_s^2 + b_s^2}, \quad x_{BX} = x_1 + \frac{b_s}{g_s^2 + b_s^2};$$

8.3) рассчитываем ток и момент двигателя (в относительных единицах)

$$I(s) = \frac{1}{\sqrt{R_{BX}^2 + x_{BX}^2}}, \quad M(s) = \frac{I^2(s)(1 - s_{ном})(R_{BX} - R_1)}{\cos \varphi_{ном} \eta_{ном}};$$

8.4) переводим ток и момент в физические величины -  $A$  и  $Hm$ , приняв за базисные значения тока  $I_B = I_{ном}$  и момента  $M_B = P_{ном} / \omega_{ном}$  ( $\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30$ ), по формулам:

$$I(s) := I(s) \cdot I_B, \quad M(s) := M(s) \cdot M_B;$$

8.5) строим механическую и электромеханическую характеристики АД.

Приведенная методика синтеза, гарантирующая прохождение МХ и ЭМХ через точки пускового и номинального режимов, не гарантирует их прохождение через точку критического момента  $M_K$  (рис. 2.13, б). Исправить эту ситуацию можно переходом к ротору с количеством клеток на нем больше двух.

## Вопросы и задания

1. Почему формула Клосса слишком неточная и в каких случаях ее применение допустимо?
2. Как рассчитать сопротивления статора и входные сопротивления АД?
3. Как рассчитать входные проводимости двухклеточного ротора АД?
4. Составьте уравнения проводимостей цепи ротора, выраженное через сопротивления клеток для номинального и пускового режима.
5. Как рассчитать ЭМХ и МХ двухклеточного АД?

### 2.11 Способы пуска АД

При пуске АД потребляет из сети значительный пусковой ток  $I_{II}=(5...7)I_{ном}$ , развивая при этом пусковой момент  $M_{II}=(1,2...1,6)M_{ном}$ , который находится на пределе обеспечения быстрого разгона АД под номинальной нагрузкой. При эксплуатации АД естественным является оптимизация пуска через снижение пускового тока при максимальном сохранении его пусковых возможностей.

И пусковой ток и пусковой момент прямо зависят от величины напряжения  $U_1$  АД, причем  $I_{II}$  пропорционален первой степени напряжения  $U_1$  (2.14), а МП пропорционален второй степени напряжения  $U_1^2$  (2.21) и (2.22). Стремление ограничить  $I_{II}$  уменьшением  $U_1$  в еще большей степени понижает МП. Таким образом, оптимизация процесса пуска АД путем изменения  $U_1$ , является противоречивой и, поэтому в полной мере неразрешимой.

Проанализируем на оптимальность применяемые способы пуска АД.

#### 1. Прямой пуск

Схема прямого пуска приведена на рис. 2.14, а. АД подключается к сети непосредственно с помощью контактора  $K$ .

Достоинства схемы пуска:

- минимальный и самый дешевый состав электрооборудования;
- максимальный пусковой момент и АД можно включать под нагрузкой.

Недостатком схемы пуска является максимальный пусковой ток.

#### 2. Реакторный пуск

Схема реакторного пуска приведена на рис. 2.14, б. В схему входят реактор  $x_p$  (катушка индуктивности) и два контактора –  $K_1$  и  $K_2$ . Сначала

замыкается контактор  $K_1$  и АД получает питание из сети с напряжением  $U_C$  через реактор  $x_p$ . На реакторе протекающим током  $I_1$  образуется падение напряжения  $\Delta U_1$ , и на АД подводится пониженное напряжение  $U_1$ . По завершении разгона, когда ток  $I_1$  снижается в (5...7) раз (рис.2.8), замыкают контактор  $K_2$ , и АД оказывается подключенным к сети непосредственно на напряжение  $U_C$ .

Достоинства схемы пуска:

- снижается пусковой ток в  $(U_C / U_1)$  раз;
- незначительное удорожание схемы пуска.

Недостатком схемы пуска является значительное снижение пускового момента пропорционального  $(U_C / U_1)^2$  из-за чего пуск нагруженного АД невозможен.

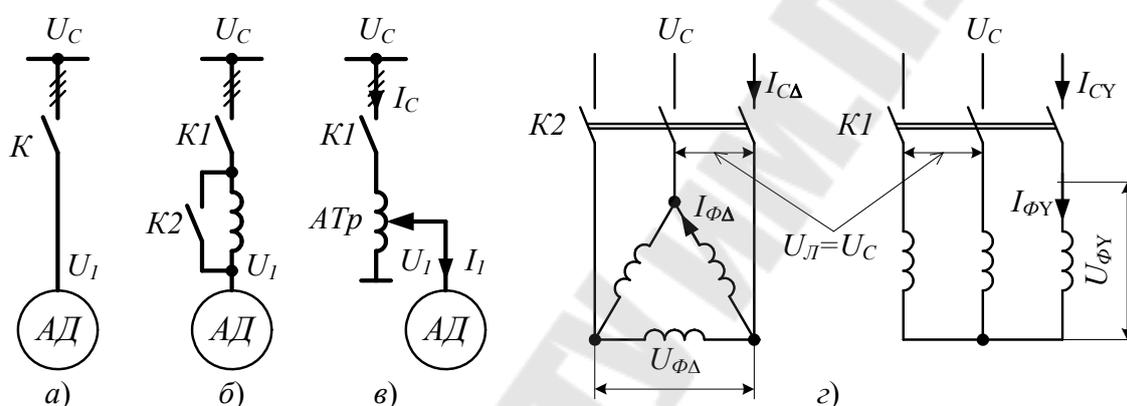


Рисунок 2.14 - Схемы пуска АД: прямой (а), реакторный (б), автотрансформаторный (в) и переключением схемы обмоток статора (г)

### 3. Автотрансформаторный пуск

Схема автотрансформаторного пуска приведена на рис. 2.14, в. В схему входят автотрансформатор АТ и контактор  $K_1$ . После замыкания контактора  $K_1$  автотрансформатор получает питание от сети, а с отвода его обмотки питается АД. АТ работает как понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации  $k_{ATP} > 1$ . Напряжение  $U_1$  на АД пониженное в  $k_{ATP}$  раз в сравнении с сетевым  $U_C$ . Ток  $I_1$  АД и, следовательно, и пусковой ток  $I_{II}$  уменьшается в  $k_{ATP}$  раз пропорционально снижению  $U_1$ . Пусковой момент, как пропорциональный, понижается в  $(U_C / U_1)^2 = k_{ATP}^2$  раз. Токи  $I_1$  и  $I_C$  связаны между собой также коэффициентом трансформации  $I_C = I_1 / k_{ATP}$ , и так как ток  $I_1$  уже понизился в  $k_{ATP}$  раз, то сетевой ток  $I_C$  понизился в  $k_{ATP}^2$  раз. Итак, при автотрансформаторном пуске АД и пусковой ток и пусковой момент понижаются в одинаковое число раз – в  $k_{ATP}^2$  раз.

Достоинством схемы пуска является меньшее в сравнении с предыдущими схемами пуска АД снижение пускового момента АД;

Недостатком схемы пуска является значительное ее удорожание из-за большой стоимости автотрансформатора.

#### 4. Пуск с переключением схемы соединения обмоток статора

Схема пуска приведена на рис. 2.14, з. В схему входят два контактора -  $K_1$  и  $K_2$ . Рабочей схемой включения обмоток АД является треугольник. На время пуска обмотки АД соединяются в звезду.

При соединении в треугольник фазные напряжения  $U_{\phi\Delta}$  равны линейному сетевому  $U_C$ . Фазные и линейные токи равны:

$$I_{\phi\Delta} = \frac{U_C}{z_\phi}, \quad I_{C\Delta} = I_{J\Delta} = \sqrt{3}I_{\phi\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_C}{z_\phi}, \quad (2.35)$$

где  $z_\phi$  – сопротивление фазной обмотки статора.

При соединении в звезду фазные напряжения  $U_{\phi\Delta}$  в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного сетевого  $U_C$ . Фазные и линейные токи совпадают и равны:

$$I_{\phi Y} = \frac{U_C}{\sqrt{3}z_\phi}, \quad I_{CY} = I_{JY}. \quad (2.36)$$

Отношения фазных напряжений и сетевых токов в соответствии с (2.35) и (2.36) равны

$$\frac{U_{\phi Y}}{U_{\phi\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad \frac{I_{CY}}{I_{C\Delta}} = \frac{U_C}{\sqrt{3}z_\phi} : \frac{\sqrt{3}U_C}{z_\phi} = \frac{1}{3}. \quad (2.37)$$

Так как фазные напряжения на обмотках статора АД уменьшились в  $\sqrt{3}$  раз, то пусковой момент МП уменьшился в 3 раза. Токи, потребляемые схемой включения АД в звезду, также уменьшились в 3 раза.

По эффективности данный способ пуска сопоставим со схемой автотрансформаторного пуска, но намного дешевле. Естественно, при трехкратном уменьшении пускового момента АД можно включать в работу только полностью разгруженным.

#### 5. Частотный пуск АД

Схема частотного пуска применяется в тех случаях, когда источником питания для АД является не сеть, а преобразователь частоты ПЧ (см. рис. 2.15 в следующей теме 2.12). С помощью ПЧ можно постепенно и

плавно при пуске повышать и напряжение и частоту, что обеспечит малый ток статора АД за счет пониженного напряжения и одновременно большой момент (в идеале равный критическому  $M_k$ ) за счет пониженной частоты напряжения.

### Вопросы и задания

1. Какими показателями оценивается оптимальность способа пуска АД?
2. Поясните способ прямого пуска АД.
3. Поясните способ реакторного пуска АД.
4. Поясните способ автотрансформаторного пуска АД.
5. Поясните способ пуска АД путем переключения схемы соединения его статорных обмоток.
6. Поясните способ частотного пуска АД.

### 2.12 Частотное регулирование скорости АД по цепи статора

Схема частотного регулирования приведена на рис. 2.15, а. В схему входит преобразователь частоты (ПЧ), к ПЧ подведено сетевое напряжение с уровнем  $U_C$  и частотой  $f_C$ . На выходе ПЧ формируется синусоидальное напряжение с произвольным уровнем  $U_1$  и частотой  $f_1$ . Возможно раздельное регулирование уровня напряжения  $U_1$  и его частоты  $f_1$ . Все параметры и характеристики АД, полученные при номинальных значениях уровня напряжения  $U_{1ном}$  и его частоты  $f_{1ном}$  называются естественными и они снабжаются в обозначениях индексом "Е". Если уровень напряжения  $U_1$  или его частота  $f_1$  отличаются от номинальных, то все параметры и характеристики АД называются искусственными и они снабжаются в обозначениях индексом "И".

При анализе схем регулирования частоты с помощью ПЧ необходимо использовать следующие выражения:

1) формулу частоты вращения поля статора (2.3)  $\omega_0 = \frac{\omega_1}{p_{II}}$ ;

2) формулу критического скольжения (2.20)  $s_k = \frac{R'_2}{x_k} = \frac{R'_2}{\omega_1 L_k}$ ;

3) формулу критического момента (2.21)  $M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 x_k} = \frac{3p_{II}}{2L_k} \left( \frac{U_1}{\omega_1} \right)^2$ ;

4) формулу пускового тока (2.15)  $I_{1П} = \left| \frac{1}{R_0 + jx_0} + \frac{1}{R_K + j\omega_1 L_K} \right| \cdot U_1;$

5) формулу пускового момента (2.22)  $M_{П} = \frac{2M_K s_K}{1 + s_K^2}.$

### 1. Регулирование частоты снижением уровня $U_1$ при $f_1 = \text{const}$

Синхронная частота  $\omega_0$  и критическое скольжение  $s_K$  не изменятся, так как они не зависят от  $U_1$ . Пусковой ток  $I_{П}$  уменьшится пропорционально уменьшению  $U_1$  а критический  $M_K$  и пусковой  $M_{П}$  моменты уменьшатся в большей степени, так как пропорциональны  $U_1^2$  (рис. 2.15, б).

Для установления факта регулирования частоты вращения АД нанесем график момента сопротивления нагрузки  $M_C$ . Точками пересечения графиков МХ АД и МХ нагрузки определяются частоты вращения АД. Видно, что этим способом можно регулировать частоту вращения в небольших пределах от  $\omega_0$  до  $\omega_K$ , что составляет всего (15...20)% от всего диапазона скоростей АД. Кроме того, снижается запас устойчивости работы АД, так как критический момент  $M_K$  резко снижается. Из-за этих серьезных недостатков рассмотренный способ регулирования частоты практически не применяется.

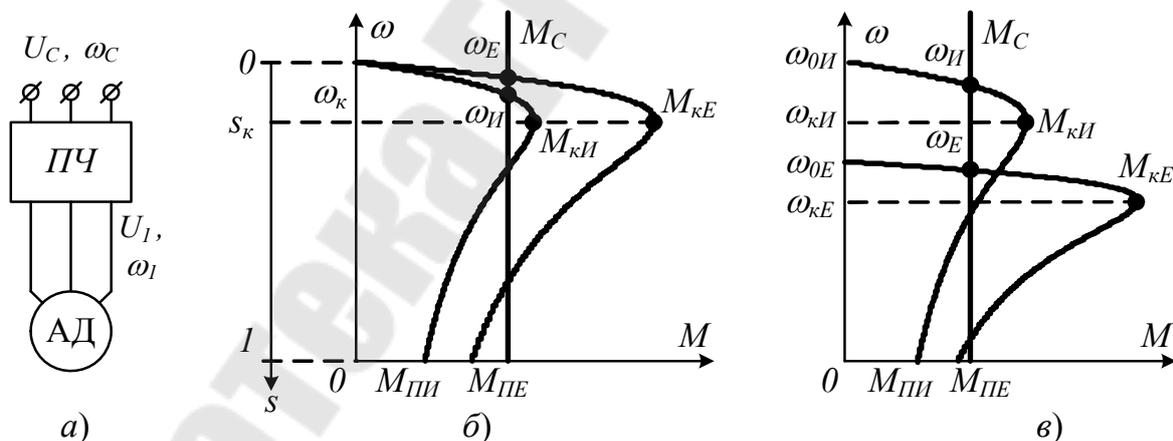


Рисунок 2.15 - Частотное регулирование скорости АД: схема питания от ПЧ (а), регулирование уровнем напряжения питания (б) и его частоты (в)

### 2. Регулирование скорости АД повышением частоты $f_1$ при $U_1 = \text{const}$

Синхронная частота  $\omega_0$  увеличивается, а все остальные параметры МХ и ЭМХ АД уменьшаются, причем наиболее интенсивно понижаются критический  $M_k$  и пусковой  $M_{II}$  моменты, менее интенсивно – пусковой ток  $I_{II}$  (рис. 2.15, в). При наложении графика МХ нагрузки на графики МХ АД обнаруживается повышение частоты вращения АД. Рассмотренный способ регулирования частоты применяется редко, так у АД допускается небольшое (до 50%) увеличение частоты вращения выше синхронной.

### 3. Регулирование скорости АД одновременным изменением вверх или вниз уровня напряжения $U_1$ и его частоты $f_1$

В зависимости от вида МХ нагрузки различают разные законы одновременных изменений уровня напряжения  $U_1$  и его частоты  $f_1$ .

3.1. Уровень напряжения  $U_1$  и его частота  $f_1$  изменяются пропорционально друг другу:  $U_1/f_1 = const$ .

Такой закон регулирования называется линейным частотным законом (рис. 2.16, а).

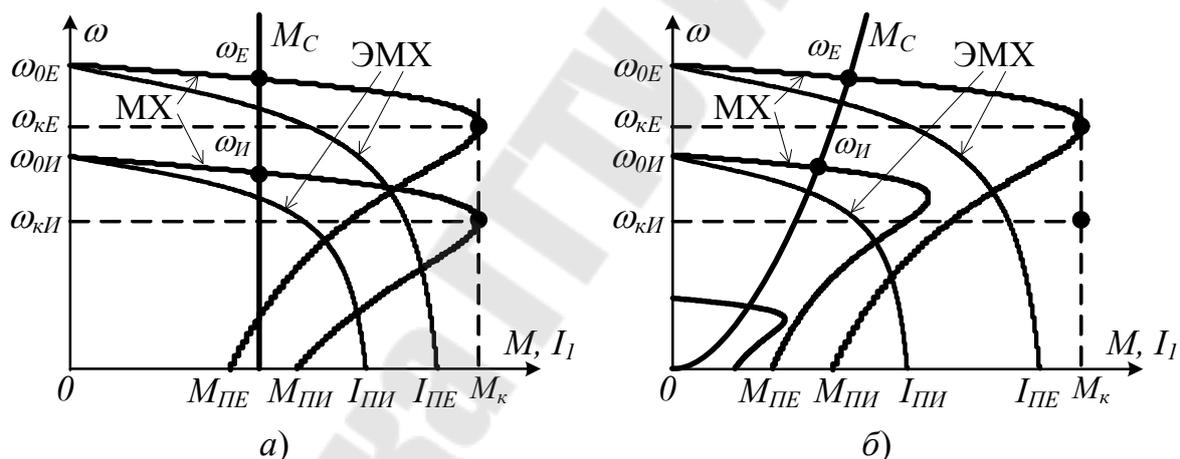


Рисунок 2.16 - Частотное регулирование скорости АД: линейный закон регулирования напряжения и частоты (а) и параболический (б)

Рассмотрим, для определенности, вариант снижения уровня напряжения  $U_1$  и его частоты  $f_1$ . Синхронная частота  $\omega_0$  уменьшается, а критический момент  $M_k$  остается неизменным, так как он пропорционален отношению  $U_1/f_1$ , а это отношение постоянно. Пусковой ток  $I_{II}$  уменьшится пропорционально понижению  $U_1$ , а одновременное уменьшение  $\omega_1$  практически не изменяет ток  $I_{II}$ , так как  $\omega_1$  входит неполно (в качестве одного из слагаемых суммы  $R_k + j\omega_1 L_k$ ) в знаменатель только второй дроби формулы (2.15). Пусковой момент  $M_{II}$  увеличивается, что доказывается расчетом:

$$M_{II} = \frac{2M_{\kappa} s_{\kappa}}{1 + s_{\kappa}^2} \approx 2M_{\kappa} s_{\kappa} = 2M_{\kappa} \frac{R_2'}{\omega_1 L_K}. \quad (2.38)$$

Способ регулирования частот вращения имеет следующие достоинства:

- частоту вращения  $\omega$  можно регулировать в диапазоне 0...150%;
- критический момент  $M_{\kappa}$  неизменен и перегрузочная способность АД остается всегда на высочайшем уровне;
- пусковой момент  $M_{II}$  повышается, что позволяет плавно разгонять АД под нагрузкой путем плавного изменения частоты  $\omega_1$ ;
- пусковой ток  $I_{II}$  уменьшается, а при плавном пуске и разгоне АД он остается постоянно малым, и ПЧ никогда из сети не будет потреблять ток в 5...7 крат номинального (фактически в используемых в электроприводе ПЧ пусковой ток ограничен уровнем не более  $1,5 \cdot I_{ном}$ ).

Рассмотренный способ регулирования целесообразно использовать в электроприводе с постоянным моментом сопротивления нагрузки –  $M_C = const$ .

3.2. Уровень напряжения  $U_1$  прямо пропорционален квадрату частоты  $f_1$ :  $U_1 = c \omega_1^2$ , где  $c = const$ .

Такой закон регулирования называется параболическим частотным законом (рис. 2.16, б). Его применение целесообразно для привода механизмов имеющих параболическую МХ (вентиляторы, центробежные насосы и т.п.). При таком способе напряжение  $U_1$  понижается быстрее понижения частоты  $\omega_1$ .

В результате:

- перегрузочная способность АД в электроприводе остается неизменной;
- снижение тока  $I_1$  и в том числе - пускового  $I_{II}$  глубже, чем при линейном частотном законе регулирования, а это снижает потери мощности в АД и повышает его КПД.

Иные способы управления скоростью АД с короткозамкнутым ротором, кроме частотного, не применяются. Несмотря на дороговизну ПЧ, рассмотренные схемы регулирования частоты вращения АД получили самое широкое распространение потому, что в электроприводе используется самый дешевый, надежный, имеющий большой срок службы (до 20 лет) АД с короткозамкнутым ротором.

### Вопросы и задания

1. Какие законы регулирования скорости АД реализуются при частотном управлении?

2. Поясните способ регулирования частоты АД изменением напряжением питания.

3. Поясните способ регулирования частоты АД изменением частоты напряжения питания.

4. Поясните способ регулирования частоты АД одновременным изменением уровня напряжения питания и его частоты.

5. В каких случаях целесообразно применять линейный закон частотного управления АД, а в каких – параболический?

### 2.13 Регулирование частоты вращения АД с фазным ротором

Кроме АД с короткозамкнутым ротором существуют также АД с фазным ротором, у которого на роторе имеются три обмотки, соединенные в звезду, свободные концы которой выведены на контактные кольца. Обмотки ротора выполняются так же, как обмотки статора и имеют то же число полюсов. К контактным кольцам, которые изолированы друг от друга и от вала двигателя, прижаты щетки с гибкими проводниками-отводами. Концы гибких проводников выведены на клеммы соединительной коробки с клеммами АД. К этим клеммам подсоединяются активные сопротивления, которые соединены в звезду (рис. 2.17, а). С помощью указанных активных сопротивлений, величина которых может изменяться либо ступенчато (рис. 2.17, а), либо непрерывно (рис. 2.17, в) решаются следующие задачи:

- 1) разгона двигателя с ограниченным током статора;
- 2) регулирования частоты вращения.

При анализе схем регулирования частоты с помощью ПЧ необходимо использовать следующие выражения, учитывающие также в виде замыканий  $R'_2$  на добавочные сопротивления  $R'_2 + R'_0$ , подключенные к ротору:

1) формулу частоты вращения поля статора (2.3)  $\omega_0 = \frac{\omega_1}{p_p}$ ;

2) формулу критического скольжения (2.20)  $s_k = \frac{R'_2 + \Sigma R'_0}{x_k}$ ;

3) формулу критического момента (2.21)  $M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 x_k}$ .

При введении добавочных сопротивлений  $R_0$ :

- синхронная частота  $\omega_0$  не изменяется, так как она не зависит от  $R_\delta$  (2.3);

- критическое скольжение  $s_k$  увеличивается в прямой пропорции от суммы  $\Sigma R_\delta$  подключенных дополнительных сопротивлений (2.20); пропорционально увеличению критического скольжения  $s_k$  увеличивается наклон искусственной механической характеристики (рис. 2.8);

- критический момент  $M_k$  не изменяется, так как он не зависит от  $R_\delta$  (2.21).

Все эти особенности учтены в графиках МХ (рис. 2.17, б).

ЭМХ при скольжениях меньших критического  $s_k$  имеет с МХ одинаковый знак наклона, но ЭМХ имеют чуть большую кривизну (рис. 2.17). Эта особенность учтена в графиках ЭМХ, нанесенных на рис. 2.17, б.

### 1. Режим разгона АД с фазным ротором

Параметры разгона АД с фазным ротором таковы, что ток статора во время разгона находится в пределах (1,3...2,6)  $I_{ном}$ , и вращающий момент не только не понижается, а, наоборот, возрастает и находится в пределах (1,1...2,2)  $M_{ном}$ . Этим разгон АД с фазным ротором выгодно отличается от разгона АД с короткозамкнутым ротором.

Для разгона осуществления разгона назначаются:

- максимальный ток  $I_{П1}$  на уровне (2,2...2,6)  $I_{ном}$  во время разгона;
- минимальный ток  $I_{П2}$  на уровне (1,1...1,3)  $I_{ном}$  во время разгона.

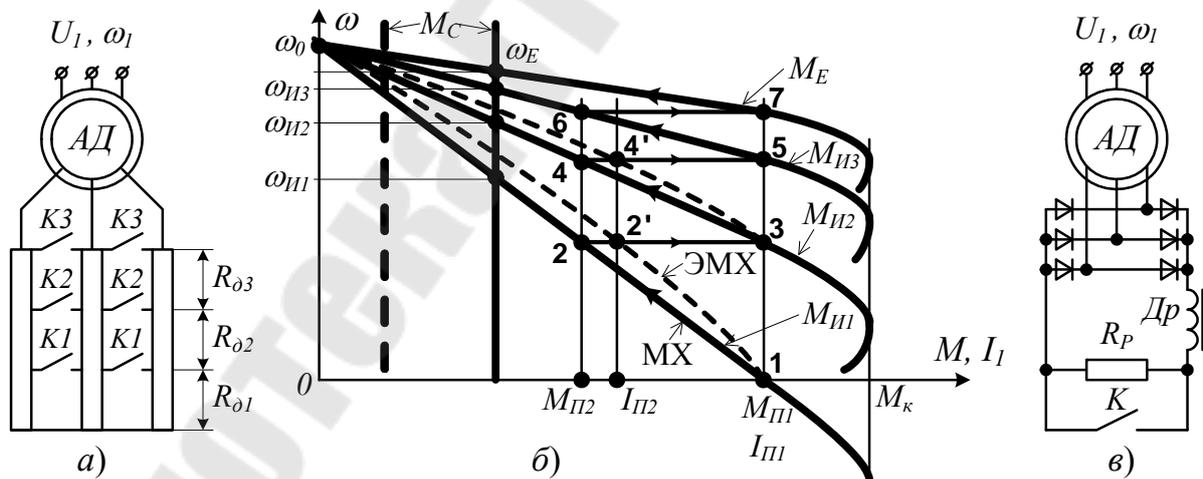


Рисунок 2.17 - Схема (а) и ЭМХ и МХ (б) ступенчатого реостатного регулирования частоты вращения АД с фазным ротором; схема импульсного регулирования частоты вращения АД с фазным ротором (в)

Процесс разгона АД сопровождается следующими состояниями схемы (рис. 2.17, а):

1. Контакты К1, К2, К3 всех контакторов разомкнуты и в цепь ротора введено три добавочных сопротивления  $R_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$  и  $R_{\delta 3}$  и  $\Sigma R_{\delta}$  максимальное. Критическое скольжение самое большое, наклон 1-й искусственной ЭМХ, проходящей через точку 1, максимален. Сопротивления  $R_{\delta 1}$ ,  $R_{\delta 2}$  и  $R_{\delta 3}$  выбираются такими, чтобы ток статора был бы равным  $I_{П1}$ . (точка 1).

2. АД разгоняется, во время разгона ток падает по 1-й искусственной ЭМХ. В точке 2', когда ток станет равным  $I_{П2}$ , замыкается контакт  $K_1$  контактора. Остаются в работе два добавочных сопротивления  $R_{\delta 2}$  и  $R_{\delta 3}$  и  $\Sigma R_{\delta}$  уменьшается. Следует скачок тока статора до  $I_{П1}$  в точку 3.

3. АД разгоняется далее, во время разгона ток падает по 2-й искусственной ЭМХ. В точке 4' шунтируется очередное добавочное сопротивление  $R_{\delta 2}$  и следует скачок тока статора до  $I_{П1}$  в точку 5.

4. АД разгоняется далее. В точке 6' шунтируется последнее добавочное сопротивление  $R_{\delta 3}$  и следует скачок в точку 7, которая принадлежит естественной ЭМХ. АД достигает номинальной частоты вращения.

Те же самые процессы разгона могут быть рассмотрены на базе МХ, для которых назначаются:

- максимальный момент МП1 на уровне (1,8...2,2)  $M_{ном}$  во время разгона;

- минимальный момент МП2 на уровне (1,2...1,3)  $M_{ном}$  во время разгона.

Аналогично вышеописанному, разгон состоит в последовательном прохождении точек МХ от 1-й до 7-й.

Итак, во время разгона:

- максимальный ток  $I_{П1}$  не превышал  $2,6I_{ном}$ ;

- минимальный момент  $M_{П2}$  не опускался ниже  $1,2M_{ном}$ .

Это идеальные условия разгона сопоставимые с частотным пуском АД.

## **2. Способ регулирования частоты вращения АД с фазным ротором**

Наносим на плоскость  $M-\omega$  график  $M_C$  МХ нагрузки (сплошная линия). Точки пересечения графика  $M_C$  с графиками МХ АД являются точками установившихся частот вращения  $\omega_{И1}$ ,  $\omega_{И2}$ ,  $\omega_{И3}$  и  $\omega_E$  нагруженного АД.

Достоинство способа состоит в простоте элементной базы, которая содержит несколько контакторов и несложную схему управления ими.

Недостатками способа являются:

- 1) небольшой диапазон регулирования частоты вращения (частоту можно понизить максимум в 3 раза);

- 2) ступенчатость регулирования частот (всего четыре частоты вращения  $\omega_{И1}$ ,  $\omega_{И2}$ ,  $\omega_{И3}$  и  $\omega_E$ );

- 3) мягкость (большой наклон) искусственных МХ, что приводит к нестабильности частоты вращения при изменении величины нагрузки

(пунктирный график МС имеет другие точки пересечения с графиками МХ АД);

4) большие потери мощности в добавочных сопротивлениях (КПД не выше 50%).

Устранить ступенчатость регулирования и несколько упростить схему силовой цепи можно, применив схему, изображенную на рис. 2.17, в. В цепь ротора через мостовой трехфазный выпрямитель подключено регулировочное сопротивление  $R_p$ . Параллельно сопротивлению включен контакт ключа  $K$ . Периодическим замыканием ключа с изменяющимся соотношением между временем, когда он замкнут, и когда разомкнут, позволяет плавно изменять среднее значения сопротивления, подключенного к ротору.

### Вопросы и задания

1. Как устроен АД с фазным ротором и какова область его применения?
2. Как изменяются параметры МХ и ЭМХ при включении в цепь ротора дополнительных сопротивлений?
3. Поясните режим разгона АД с фазным ротором.
4. Поясните способ регулирования частоты вращения АД с помощью добавочных сопротивлений в цепи ротора.

### 2.14 Полюсопереключаемые АД

Как следует из формулы частоты вращения поля статора (2.3)

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p_{II}},$$

синхронная частота АД обратнопропорциональна числу пар полюсов  $p_{II}$ .

Это свойство открывает еще один путь регулирования частоты вращения путем изменения числа пар полюсов.

На рис. 2.18 представлены схемы соединения обмоток фазы  $A$  для АД с двумя парами полюсами ( $p_{II}=2$ ,  $n_0=1500$  об/мин) и одной парой полюсов ( $p_{II}=1$ ,  $n_0=3000$  об/мин). При  $p_{II}=2$  число катушек обмотки равно 4 и соединяются катушки между собою так, чтобы направления токов в соседних катушках были бы встречными - против и по часовой стрелке. В таком статоре полюса катушек будут чередоваться: N – S - N – S (рис. 2.18, а) и их будет 4.

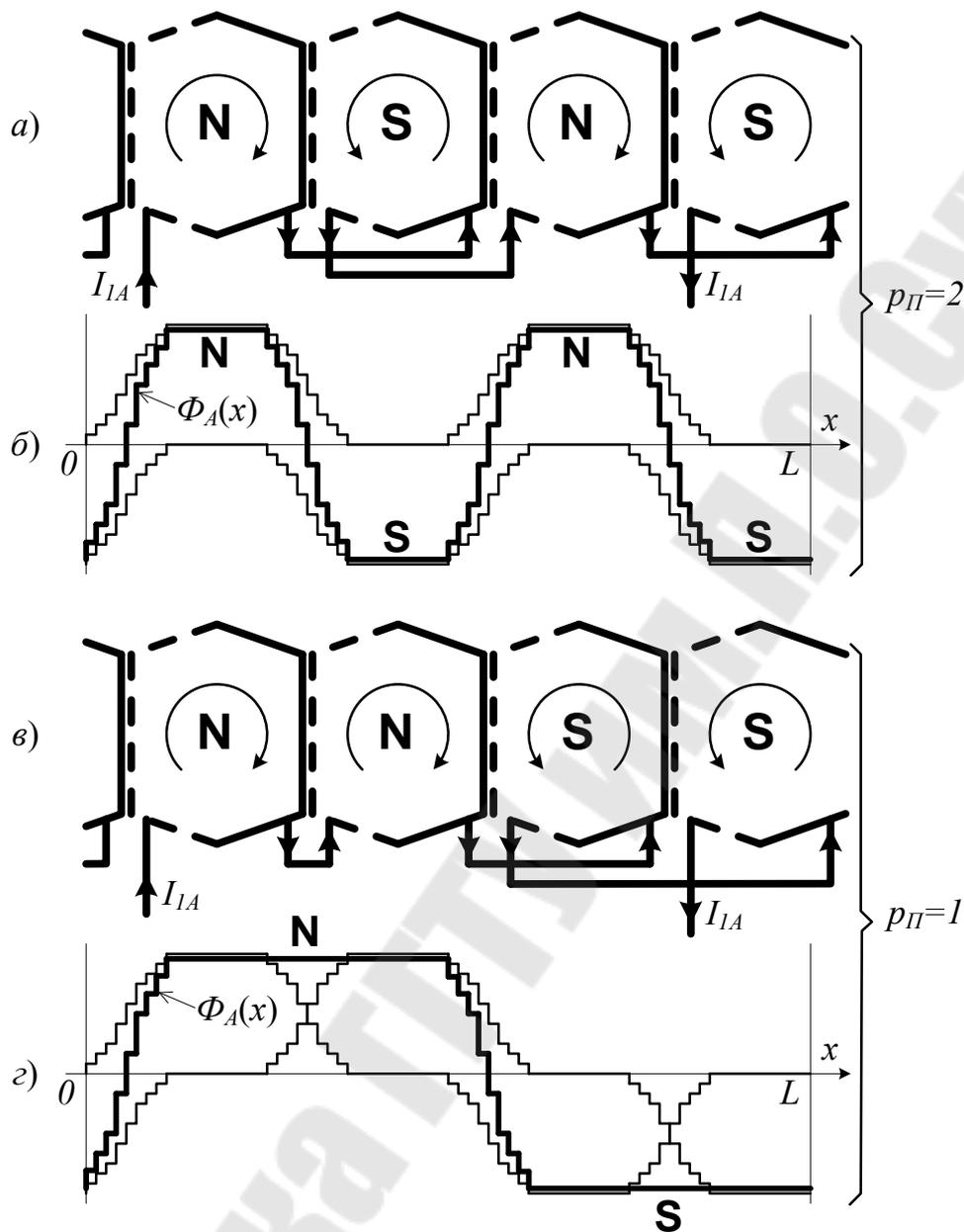


Рисунок 2.18 - Полюсопереключаемые АД: схема соединения обмоток (а) и график магнитного поля (б) обмотки фазы  $A$  статора АД при  $p_{II}=2$ ; схема соединения обмоток (в) и график магнитного поля (г) обмотки фазы  $A$  статора АД при  $p_{II}=1$

При  $p_{II}=1$  число катушек обмотки равно 4 и соединяются катушки между собою так, чтобы направления токов в первой паре катушек были бы однонаправленными, а во второй паре – между собой однонаправленными, а с первой парой катушек – встречными. В таком статоре полюса катушек будут чередоваться: N – S (рис. 2.18, в), но их будет всего два.

На рис. 2.18, б показан график магнитного поля  $\Phi_A(x)$  обмотки фазы  $A$  (утолщенная ступенчатая линия) при  $p_{II}=2$  и графики магнитный

полей катушек (тонкие ступенчатые линии). График магнитного поля близок к синусоидальному виду.

На рис. 2.27, *з* показан график магнитного поля  $\Phi_A(x)$  обмотки фазы А (утолщенная ступенчатая линия) при  $p_{II}=1$  и графики магнитных полей катушек (тонкая ступенчатая линия), на которых учтено изменение направления токов согласно рис. 2.18, *в*. График магнитного поля является трапецеидальным, но не синусоидальным, так как слишком протяженная верхняя часть графика, на которой поле постоянно.

Если разложить на гармонические составляющие графики магнитных полей  $\Phi_A(x)$  обмотки фазы А, приведенные на рис. 2.18, *б* и рис. 2.18, *з*, то окажется, что уровень гармоник в графике  $\Phi_A(x)$  при  $p_{II}=2$  настолько мал, что ими можно пренебречь, а в графике  $\Phi_A(x)$  при  $p_{II}=1$  достаточно велик, так что пренебречь гармониками нельзя.

Рассмотрим влияние наибольших по амплитуде 1-й (основной) и 3-й и 5-й (высших) гармоник на МХ и КПД АД.

Влияние 1-й гармоники. Это основная гармоника и ее частота равна частоте напряжения сети  $\omega_1$ . Магнитные поля трех обмоток изменяются во времени по синусоидальным законам с фазовым электрическим сдвигом в  $120^\circ$ :

$$\begin{cases} \Phi_{1A} = \Phi_{1m} \sin \omega_1 t, \\ \Phi_{1B} = \Phi_{1m} \sin(\omega_1 t - 2\pi/3), \\ \Phi_{1C} = \Phi_{1m} \sin(\omega_1 t - 4\pi/3). \end{cases} \quad (2.39)$$

Этими полями создается вращающееся, например, против часовой стрелки магнитное поле статора  $\Phi_{1cm}$ . Поле статора  $\Phi_{1cm}$  создает основную вращающий момент  $M_1$  АД, который и определяет использование двигателя по назначению.

Влияние 3-й гармоники. Это ближайшая к основной гармонике и ее частота равна  $3\omega_1$ . Магнитные поля трех обмоток изменяются во времени по синусоидальным законам с нулевым фазовым электрическим сдвигом:

$$\begin{cases} \Phi_{3A} = \Phi_{3m} \sin 3\omega_1 t, \\ \Phi_{3B} = \Phi_{3m} \sin 3(\omega_1 t - 2\pi/3) = \Phi_{3m} \sin 3\omega_1 t, \\ \Phi_{3C} = \Phi_{3m} \sin 3(\omega_1 t - 4\pi/3) = \Phi_{3m} \sin 3\omega_1 t. \end{cases} \quad (2.40)$$

Видно, что магнитные поля обмоток синфазные и ими создается не вращающееся, а пульсирующее поле  $\Phi_{3cm}$ . Поле  $\Phi_{3cm}$  создает тормозной момент  $M_3$  АД, который аналогичен моменту динамического торможения АД (см. тему 2.15).

Влияние 5-й гармоники. Это ближайшая к основной гармонике и ее частота равна  $5\omega_1$ . Магнитные поля трех обмоток изменяются во времени по синусоидальным законам с фазовым электрическим сдвигом в  $120^\circ$ , но в обратной к (2.39) последовательности фаз:

$$\begin{cases} \Phi_{5A} = \Phi_{5m} \sin 5\omega_1 t, \\ \Phi_{5B} = \Phi_{5m} \sin 5(\omega_1 t - 2\pi/3) = \Phi_{3m} \sin(5\omega_1 t + 2\pi/3), \\ \Phi_{5C} = \Phi_{5m} \sin 5(\omega_1 t - 4\pi/3) = \Phi_{3m} \sin(5\omega_1 t - 2\pi/3) \end{cases} \quad (2.41)$$

Этими полями создается вращающееся, по часовой стрелке магнитное поле статора  $\Phi_{5cm}$ . Полем статора  $\Phi_{5cm}$  создается вращающий момент  $M_5$  АД, который встречно направлен к моменту  $M_1$  от 1-й гармоники.

Механические характеристики  $M_1(\omega)$ ,  $M_3(\omega)$  и  $M_5(\omega)$  от гармонических составляющих и общая механическая характеристика  $M(\omega)$  приведены на рис. 2.19. Видно понижение вращающего момента  $M(\omega)$  в сравнении  $M_1(\omega)$ , когда магнитный попуск статора синусоиден. На разгонном участке МХ  $M(\omega)$  образовался провал вращающего момента, что может сделать невозможным разгон даже малонагруженного АД.

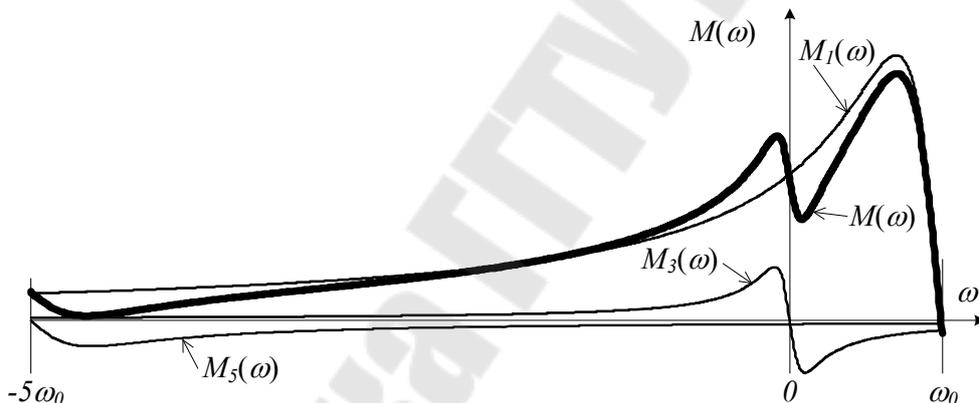


Рисунок 2.19 - Механические характеристики АД при несинусоидальном магнитном поле обмоток статора

За счет высших гармоник в магнитном поле статора возрастают потери мощности в стали  $P_{cm}$  (рис. 2.4), которые пропорциональны  $\omega_F^{1,3}$ , где  $\omega_F$  частота гармоники. Так на 3-й гармонике потери вырастут в 4,2 раза, на 5-й в 8,1 раз. Значит только на одной частоте вращения к.п.д. полюсопереключаемого АД максимально, а на других частотах существенно падает.

Полюсопереключаемые АД используются из-за простоты схемы управления изменением частоты вращения. Однако эти АД существенно дороже АД с постоянной частотой вращения, а из-за повышенных потерь в стали магнитопровода АД эксплуатируются недогруженными, чем снижают потери в меди  $P_{m1}$  и  $P_{m2}$  (рис. 2.4).

## Вопросы и задания

1. Поясните принцип изменения числа пар полюсов в полюсно-переключаемом АД.
2. Покажите, что при изменении числа пар полюсов обмотки статора искажаются графики магнитных потоков фазных обмоток.
3. Почему у полюсопереключаемых АД понижается вращающий момент?
4. Почему у полюснопереключаемых АД понижается КПД?

## 2.15 Способы торможения АД

Существуют три основных способа торможения АД:

1. Торможение противовключением.
2. Динамическое торможение.
3. Рекуперативное.

Критериями выбора способа торможения являются:

- интенсивность снижения частоты вращения;
- потери энергии при торможении.

Необходимость в электрическом торможении АД обосновывается тем, что механические тормоза рассчитаны на их использование при частоте вращения не выше  $0,2\omega_{ном}$ .

### 1. Торможение противовключением

Схема торможения приведена на рис. 2.20, а. До торможения АД был подключен к сети контактором  $KВ$  (работа с вращением вперед). Нагруженный на момент сопротивления  $M_c$  нагрузки АД работал с частотой, соответствующей точке 1 (рис. 2.20, б), и развивал двигательный момент.

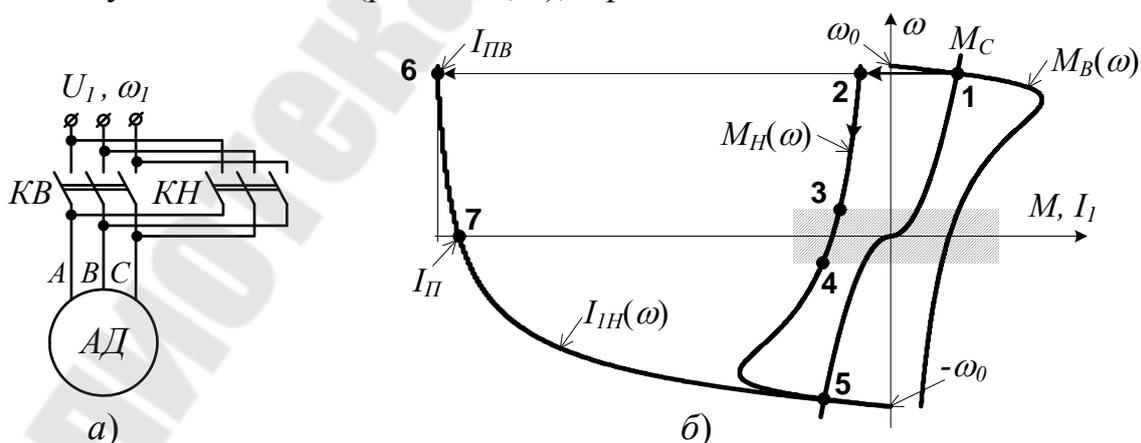


Рисунок 2.20 - Торможение противовключением (реверсированием): схема включения (а); МХ, ЭМХ и траектория движения АД (б)

Для торможения контактор  $KВ$  отключается и одновременно включается контактор  $KН$  (назад), которым изменяется порядок подключения двух фаз  $B$  и  $C$  АД к сети (можно изменять порядок подключения любых двух фаз АД). Магнитное поле статора АД изменяет направление вращения на противоположное и АД скачком по траектории 1-2 переходит на МХ  $M_H(\omega)$  вращения назад. АД снижает частоту вращения по траектории 2-3, и если его не отключить от сети после прохождения нулевой частоты вращения (полной остановки АД) он разгонится в обратную сторону по участку 4-5. Для недопущения обратного вращения нужно в интервале частот между точками 3 и 4 АД отключить от питания и наложить механический тормоз. По условиям эксплуатации правильно выбранных механических тормозов их нужно накладывать при снижении частоты до 20% от номинальной частоты вращения АД.

В начале торможения по обмоткам статора АД протекает большой ток противовключения  $I_{ПВ}=(6...8)I_{ном}$ . Однако этот ток не намного больше пускового тока равного  $I_{П}=(5...7)I_{ном}$ . Поэтому реально ток  $I_{ПВ}$  не представляет опасности для АД.

Торможение происходит интенсивно с большим темпом снижения частоты, мощность торможения выделяется в виде тепла в обмотках АД.

## 2. Динамическое торможение

Схема торможения приведена на рис. 2.21, а. До торможения АД был подключен к сети контактором  $KР$  (работа). Нагруженный на момент сопротивления  $M_C$  нагрузки АД работал с частотой, соответствующей точке 1 (2.21, б), и развивал двигательный момент.

Для торможения контактор  $KР$  отключается и одновременно включается контактор  $KТ$  (торможения), которым на два любых вывода АД подается постоянное напряжение  $U_{ДТ}$  величиной  $(0,25...0,4)U_{ном}$ .

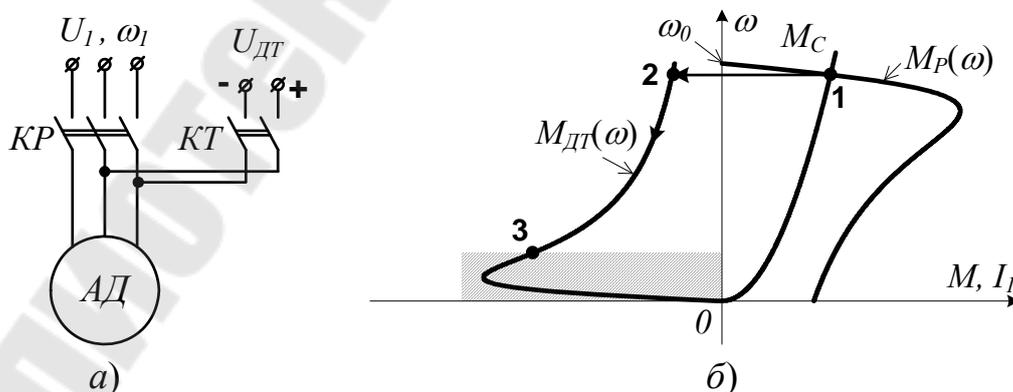


Рисунок 2.21 - Динамическое торможение АД:  
схема включения (а); МХ и траектория движения АД (б)

АД снижает частоту вращения по траектории 2-3. Точка 3 выбирается такой, чтобы в ней частота вращения АД не превышала 20% от номинальной частоты. В точке 3 АД отключается от напряжения  $U_{ДТ}$  и накладывается механический тормоз. Мощность торможения выделяется в виде тепла в обмотках АД.

Недостатком способа динамического торможения в том, что требуется применения в схеме электропривода источника постоянного напряжения.

### 3. Рекуперативное торможение

Рекуперативное торможение возникает тогда, когда по какой-либо причине частота вращения АД становится больше синхронной частоты  $\omega_0$ . Такое возникает в двух случаях:

- при опускании груза, когда АД вращается в ту же сторону, в какую груз разгоняет двигатель (рис. 2.22, а) и двигатель тормозит груз, не давая грузу неограниченно увеличивать частоту вращения АД;
- когда скачком уменьшается частота  $\omega_1$  выходного напряжения ПЧ, от которого получает питание АД (2.22, б).

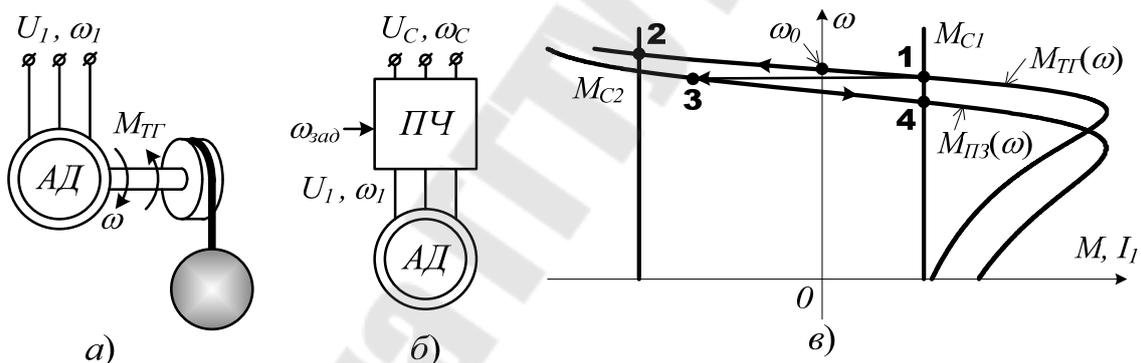


Рисунок 2.22 - Рекуперативное торможение АД: торможение опускаемого груза (а); понижение задания ПЧ (б); МХ и траектории движения АД (в)

При опускании тяжелого груза (рис. 2.22, а) с МХ нагрузки  $M_{C2}$  (рис. 2.22, в) частота вращения АД  $\omega$  увеличивается сверх синхронной  $\omega_0$ . В результате относительная частота вращения магнитного поля статора к ротору, равная  $\omega_0 - \omega$  (2.4) становится отрицательной, и, значит, поле вращается навстречу вращению  $\omega$  ротора. В соответствии с принципом действия АД (рис. 2.3), на ротор, перемещающийся в поле статора, действует сила, которая направлена в ту же сторону, в которую вращается поле. Для АД это является тормозным моментом  $M_{ТГ}$ , который тормозит спускаемый груз на скорости, определяемой точкой 2 (рис. 2.22, в). Фаза тока  $I_1$  изменится на  $180^\circ$  по отношению сетевому напряжению  $U_1$  и, если в двигательном режиме АД (при частотах  $0 < \omega < \omega_0$ ) электрический фазовый сдвиг был  $0 < \varphi < 90^\circ$ , и из сети потреблялась активная мощность  $P = 3U_1I_1\cos\varphi > 0$ ,

то на тормозном участке (при частотах  $\omega_0 < \omega$ ) активная мощность станет отрицательной:  $P = 3U_1 I_1 \cos(\varphi + 180^\circ) = -3U_1 I_1 \cos\varphi < 0$ . АД не потребляет активную мощность из сети, а, наоборот, отдает ее в сеть. Описанное явление возврата в сеть энергии торможения, называется рекуперацией энергии.

При скачкообразном понижении сигнала  $\omega_{зад}$  задания частоты  $\omega_1$  питающего АД напряжения (рис. 2.22, б) его МХ скачком переходит в МХ  $M_{ПЗ}$  с расположением, показанным на рис. 2.22, в. Следует скачкообразный переход 1-3 на тормозной участок МХ  $M_{ПЗ}$ . АД тормозится до синхронной частоты  $\omega_0$  с рекуперацией энергии торможения в сеть. Далее частота вращения  $\omega$  АД понижается до точки 4, являющейся точкой пересечения МХ  $M_{ПЗ}(\omega)$  и  $M_{С1}$ .

Рекуперативное торможение является самым выгодным в энергетическом плане – энергия торможения возвращается в сеть.

### Вопросы и задания

1. Поясните схему и МХ режима торможения АД противовключением.
2. Поясните схему и МХ режима динамического торможения АД.
3. Поясните схему и МХ режима рекуперативного торможения АД при спуске груза.
4. Поясните схему и МХ режима рекуперативного торможения АД при понижении частоты питающего напряжения.

## 3 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 3.1 Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ)

#### Вводная часть

Пусть контур (рис. 3.1, а), вращающийся с частотой  $\omega$  в магнитном поле, характеризуемым индукцией  $B$  поля, за время  $dt$  повернется на угол  $d\alpha$ , причем  $d\alpha = \omega \cdot dt$ . При поперечном  $D$  и продольном  $l$  размерах контура изменение площади  $dS$ , которую пронизывают линии магнитного поля индукцией  $B$ , за время  $dt$  будет равно

$$dS = l \cdot D \cdot d\alpha = l \cdot D \cdot \omega \cdot dt, \quad (3.1)$$

а изменение  $d\Phi$  магнитного потока  $\Phi$  за то же время  $dt$  составит

$$d\Phi = B \cdot dS = B \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt. \quad (3.2)$$

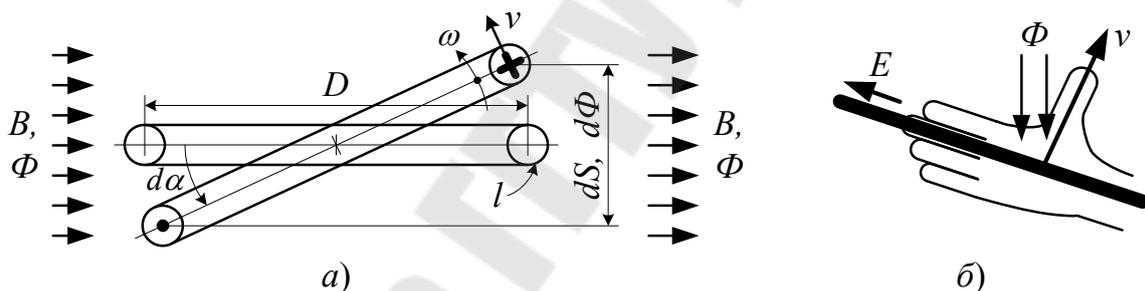


Рисунок 3.1 - К выводу правила правой руки из явления электромагнитной индукции (а) и правило правой руки (б)

В контуре в соответствии с явлением электромагнитной индукции наведётся ЭДС  $E_2$ , равная

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{d\Phi}{dt} = \frac{B \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt}{dt} = B \cdot l \cdot D \cdot \omega = \\ &= 2 \cdot B \cdot l \cdot \underbrace{\frac{D}{2}}_v \cdot \omega = 2 \cdot B \cdot l \cdot v, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $v$  - линейная скорость перемещения проводника относительно поля.

При вращении контура относительно поля перемещаются два продольных проводника  $l$ , и, поэтому в каждом из них будет наведена ЭДС  $E$ ,

составляющая ровно половину ЭДС  $E_2$  (3.3). Учитывая это, в каждом из проводников контура, перемещающемся в магнитном поле, буде наведена ЭДС, равная

$$E = B \cdot l \cdot v. \quad (3.4)$$

Формулой (3.4) установлено правило получения индукционной ЭДС  $E$  в МПТ: «В проводнике, перемещающемся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , наводится ЭДС  $E$ ».

Направление ЭДС  $E$ , определенное с помощью правила Ленца будет таким, как показано на рис. 3.1, *а*.

Построения, приведенные на рис. 3.1, *а* и вид формулы (3.4), приводят к правилу правой руки (рис. 3.1, *б*): «Правую руку нужно расположить так, чтобы в ладонь входили линии магнитного поля  $\Phi$ , а большой отогнутый палец указывал на направление перемещения проводника в поле, то на направление ЭДС укажут остальные четыре пальца».

Отмечаем, что правило правой руки не является универсальным, как является правило Ленца, применительно к базовому определению получения индукционной ЭДС, но его применение при анализе МПТ является более простым и, поэтому, предпочтительным.

### ***Устройство и принцип действия***

Двигатель постоянного тока (ДПТ) содержит (рис. 3.2):

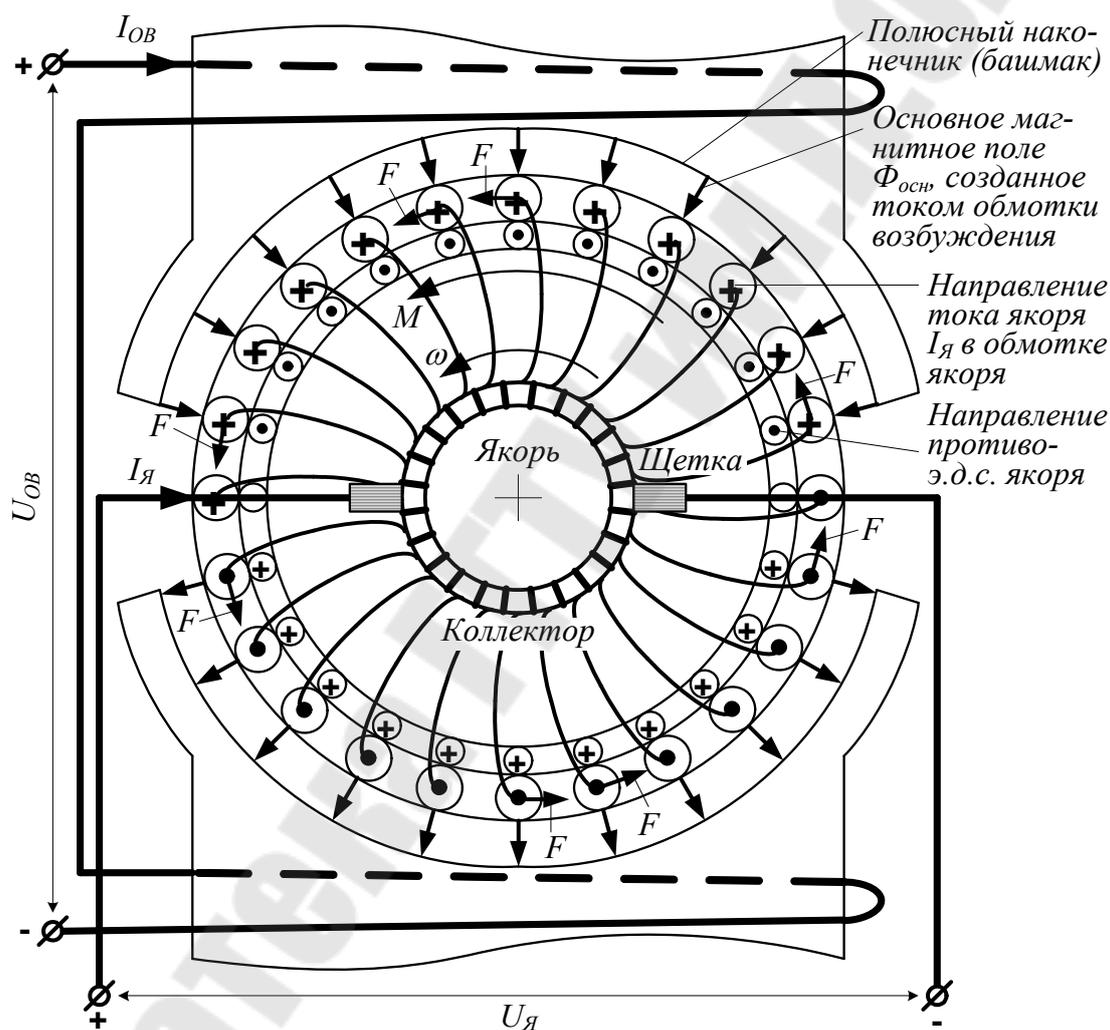
- обмотку возбуждения (ОВ), расположенную на статоре; к ОВ приложено постоянное напряжение возбуждения  $U_{ОВ}$ , которое создаёт в ней постоянный ток  $I_{ОВ}$ , который создает постоянное магнитное поле возбуждения  $\Phi_{ОВ}$ ; с помощью полюсных наконечников, называемых из-за их формы, полюсными башмаками, вдоль их создается постоянное по величине магнитное поле, направленное к центру или от центра ДПТ; это поле называется основным  $\Phi_{осн}$ ;

- ротор, называемый в ДПТ якорем; к обмотке якоря через расположенные на нем пластины коллектора и прилегающие к пластинам щетки, подводится внешнее постоянное напряжение, называемое напряжением якоря  $U_я$ ; это напряжение создает в обмотке якоря постоянный ток якоря  $I_я$ .

Принцип действия ДПТ состоит в следующем: на проводники якоря, обтекаемые током  $I_я$ , помещенные в магнитное поле  $\Phi_{ОВ}$  обмотки возбуждения, действуют механические силы  $F$ . Направление сил  $F$  определяется правилом левой руки, что отображено на рис. 3.2.

Проводники обмотки якоря укладываются в пазы якоря и подключаются к пластинам коллектора таким образом, что в частях обмотки якоря, расположенных по разные стороны относительно щеток, токи имеют одно

и то же направление. Благодаря такому исполнению якоря, силы  $F$ , действующие на все проводники якорной обмотки, создают одинаковые по направлению вращающие моменты, следовательно, складываются и этим заставляют ротор вращаться в одну сторону, например против часовой стрелки, как показано на рис. 3.2. Направление вращения якоря с частотой  $\omega$  совпадает с направлением момента  $M$ . Если изменить полярность приложенного к якорю напряжения  $U_{\text{я}}$ , то изменится направления тока  $I_{\text{я}}$  во всех проводниках обмотки якоря, и ДПТ будет вращаться в другую сторону.



Риснок 3.2 - Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока

Помимо основного эффекта – получения вращающего момента  $M$ , в ДПТ существует побочный эффект – возникновение в якоре ЭДС вращения  $E$ . Эта ЭДС возникает за счет того, что проводники якоря перемещаются в магнитном поле обмотки возбуждения  $\Phi_{\text{ОВ}}$ . Направление ЭДС вращения  $E$ , определенное по правилу правой руки, противоположно току

$I_{я}$ . Так как ток  $I_{я}$  создается приложенным к якору ДПТ напряжением  $U_{я}$ , то направления  $I_{я}$  и  $U_{я}$  совпадают, а ЭДС вращения  $E$  направлена навстречу к  $U_{я}$ . Поэтому ЭДС вращения  $E$  называют также противо-ЭДС. Установленное соотношение между направлениями  $E$  и  $U_{я}$  позволяет записать следующее уравнение цепи якоря ДПТ:

$$U_{я} - E = R_{я}I_{я} \quad \Rightarrow \quad U_{я} = E + R_{я}I_{я}. \quad (3.5)$$

В соответствии с (3.2) ЭДС вращения  $E$  прямо пропорционально индуктивности  $B$  магнитного поля возбуждения, размерам обмотки  $D$  и  $l$  и частоте вращения  $\omega$  якоря. Указанную пропорциональность принято записывать в виде

$$E = c_{\phi}\omega, \quad (3.6)$$

где  $c_{\phi}$  – коэффициент магнитного потока ДПТ.

Уравнение якорной цепи ДПТ примет вид

$$U_{я} = c_{\phi}\omega + R_{я}I_{я}. \quad (3.7)$$

### Вопросы и задания

1. Какие электромагнитные явления наблюдаются в электрических машинах?
2. Как привести явление электромагнитной индукции к правилу правой руки?
3. Поясните устройство и назначение отдельных элементов ДПТ.
4. Каков принцип действия ДПТ?
5. Какой побочный эффект возникает во вращающемся ДПТ?
6. Поясните вывод уравнения электрического состояния якорной цепи ДПТ.

### 3.2 Устройство и принцип действия генератора постоянного тока (ГПТ)

Генератор постоянного тока (ГПТ) состоит из тех же элементов, что и ДПТ (сравните рис. 3.2 и 3.3).

Назначением обмотки возбуждения является создание постоянного магнитного поля в зазоре между статором и якорем. Якорь ГПТ приводится во вращение сторонним двигателем, например, дизелем.

Принцип действия ГПТ состоит в следующем: в проводниках якоря, перемещающихся (вращающихся) в магнитном поле обмотки возбуждения  $\Phi_{OB}$  наводится ЭДС  $E$ . Направление ЭДС  $E$  определяется правилом правой руки. ЭДС  $E$  снимается со щеток и выводится на клеммы генератора.

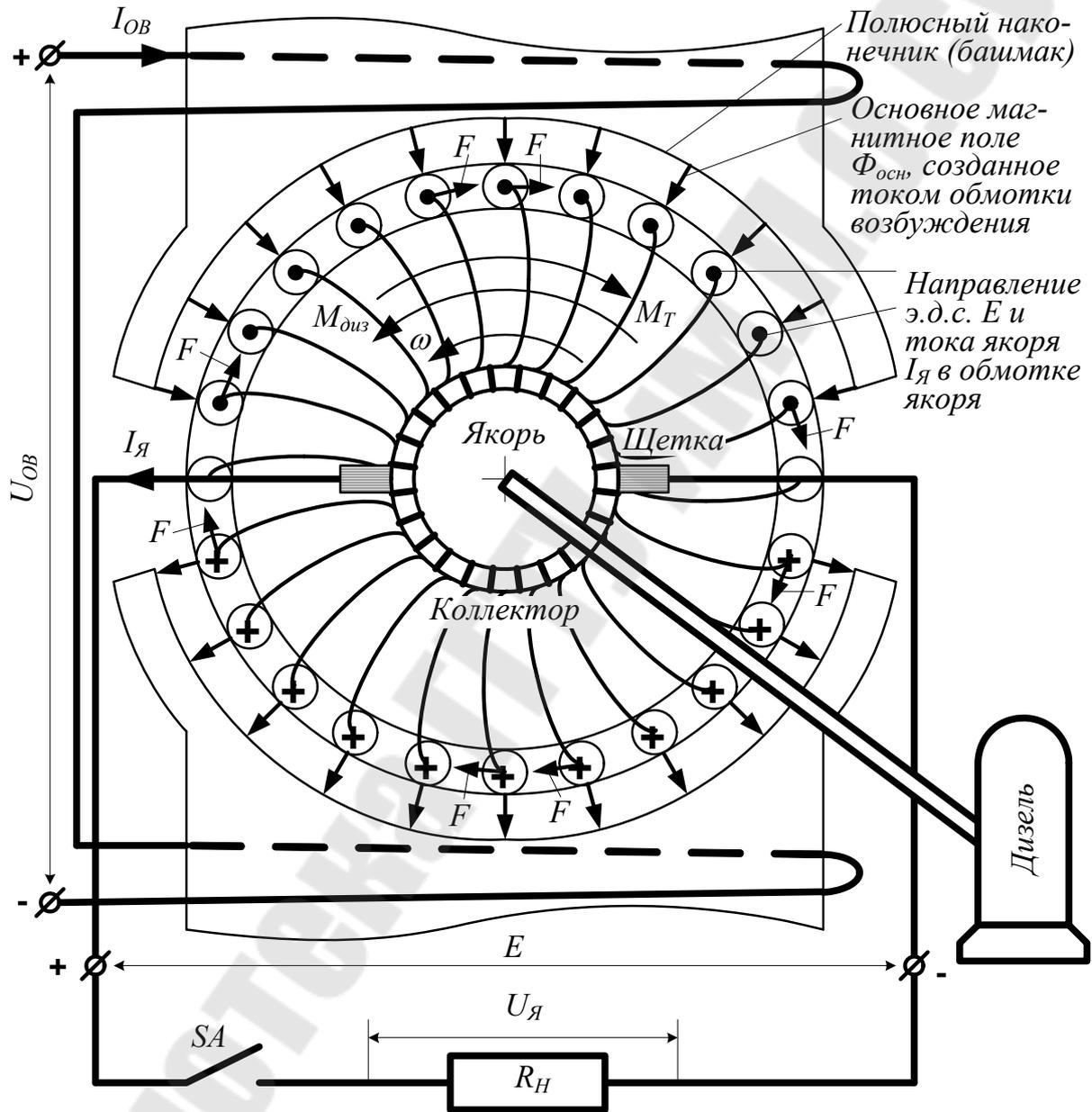


Рисунок 3.3 - Устройство и принцип действия генератора постоянного тока

Если к клеммам ГПТ подключить нагрузку  $R_H$ , замкнув ключ  $SA$ , то в нагрузке потечет ток якоря  $I_я$ , которым будет создано на сопротивлении нагрузки  $R_H$  напряжение  $U_я$ . Направление тока  $I_я$  совпадает с направлением ЭДС  $E$ .

Уравнение цепи якоря, оставленное по 2-му закону Кирхгофа, имеет вид:

$$E = U_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} \Rightarrow U_{\text{я}} = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} \Rightarrow U_{\text{я}} = c_{\Phi} \omega - R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (3.8)$$

Уравнения ГПТ (3.8) и ДПТ (3.5 и 3.7) одинаковые по структуре и отличаются только знаком тока  $I_{\text{я}}$ .

Помимо основного эффекта – получения ЭДС  $E$ , в ГПТ существует побочный эффект – возникновение тормозящего момента  $M_T$ , направлено навстречу моменту  $M_{\text{диз}}$  дизеля. Тормозящий момент  $M_T$  возникает за счет взаимодействия проводников обмотки якоря, обтекаемых током  $I_{\text{я}}$  нагруженного генератора, и магнитного поля обмотки возбуждения  $\Phi_{\text{ОВ}}$ . Направление момента  $M_T$  определенное по правилу левой руки, будет противоположным направлению момента  $M_{\text{диз}}$ , и если  $M_{\text{диз}}$  заставляет якорь вращаться с частотой  $\omega$ , то момент  $M_T$  будет направлен навстречу вращению. Величина тормозного момента  $M_T$  прямо пропорциональна коэффициенту магнитного потока  $c_{\Phi}$  ГПТ и току якоря  $I_{\text{я}}$ :

$$M_T = c_{\Phi} I_{\text{я}}. \quad (3.9)$$

Дизель развивает момент  $M_{\text{диз}}$  за счет сжигания в нем топлива, что является расходом тепловой энергии  $W_T$ . ГПТ вращается с постоянной частотой  $\omega$  благодаря тому, что дизелем постоянно поддерживается равенство моментов:  $M_{\text{диз}} = M_T$ . Возникновение момента  $W_T$  связано с током  $I_{\text{я}}$  (3.9). Этим током в сопротивлении  $R_H$  выделяется электрическая энергия  $W_{\text{э}} = R_H I_{\text{я}}^2 t$ . Энергия  $W_{\text{э}}$  может взята только из тепловой  $W_T$ . Если якорь ГПТ приводится во вращение водяной турбиной падающим на нее потоком воды, то для вращения ГПТ расходуется механическая энергия. Значит, в ГПТ происходит преобразование в электрическую энергию энергии другого вида от устройства, способного вращать якорь ГПТ.

### Вопросы и задания

1. Поясните принцип действия ГПТ и вид уравнения электрического состояния его якорной цепи.
2. Какой побочный эффект возникает в нагруженном ГПТ?
3. Поясните физику преобразования энергии сторонних механизмов, вращающих якорь ГПТ, в энергию электрическую.

### 3.3 Поперечная реакция якоря в МПТ

#### Вводная часть

Для изложения сути вопроса понадобятся рисунки, составленные на основе рис. 3.2 и 3.3. Для упрощения их начертания приняты следующие соглашения:

1. Обмотки возбуждения не будем отображать, оставим только изображения (в виде стрелок) созданного ими магнитного поля.

2. Коллектор не будем изображать, переместив щеточный контакт с обмоткой якоря на сами проводники якоря, оголив их от изоляции в местах контакта. Места установки щеток определяем по перемычкам (изогнутым линиям), проведенным от обмотки якоря в пазу до пластины коллектора. Естественно, такая конструкция контакта на практике неприемлема из-за значительного истирания щеток об выступающую обмотку.

3. Все линии магнитного поля вокруг якоря, созданные обмоткой возбуждения, заменим одним суммарным вектором  $\Phi_{осн}$  (рис. 3.4, а), оставив за ним следующее свойство породившего его поля в зазоре: в верхней части относительно щеток магнитные поля зазора направлены к центру якоря, а в нижней – от центра.

4. Примем как реальной возможность восстановления линий магнитного поля в зазоре по результирующему вектору, например,  $\Phi_{ря}$ , задав дополнительно для поля в зазоре его равномерность вдоль дуги полюсного наконечника (рис. 3.4, б).

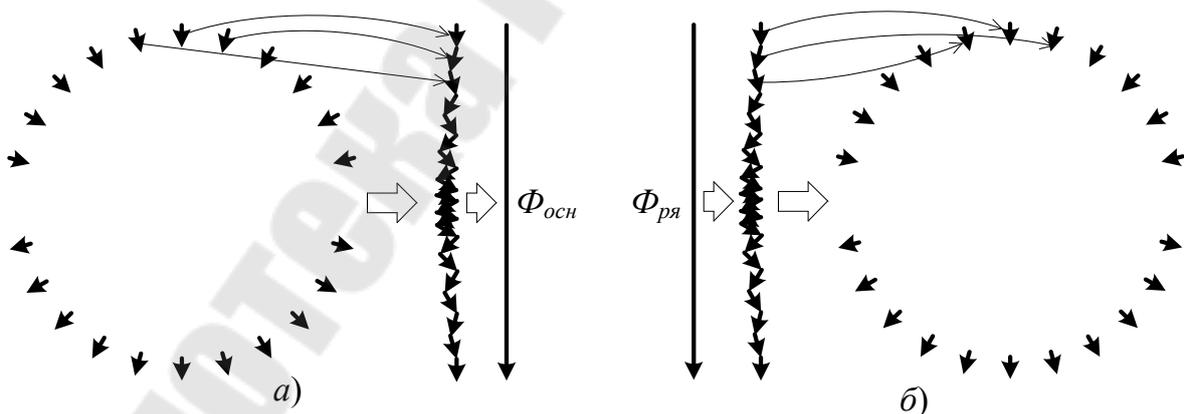


Рисунок 3.4 - Замена множества распределенных в пространстве векторов одним вектором их суммы (а) и наоборот (б)

Применение правил, изложенных в п. 3 и 4, позволяет при построениях использовать только суммарные вектора  $\Phi_{осн}$  и  $\Phi_{ря}$ , что упрощает графику рисунков, помня, что всегда можно перейти к полю в зазоре, отображенному множеством стрелок.

### Реакция якоря МПТ. Основная часть

Токи, протекающие в обмотке якоря МПТ, создают магнитное поле обмотки, называемое полем реакции якоря и обозначаемое как  $\Phi_{ря}$ . Направление вектора поля  $\Phi_{ря}$  определяется правилом буравчика. Получается, что обмотка якоря МПТ взаимодействует с полем  $\Phi_{\Sigma}$ , являющимся векторной суммой полей  $\Phi_{осн}$  и  $\Phi_{ря}$ . Естественно, это отразится на работе и рабочих характеристиках МПТ. Влияние поля  $\Phi_{ря}$  на рабочие характеристики МПТ называется реакцией якоря. Ввиду различия рабочих характеристик ДПТ и ГПТ, рассмотрим явление реакции якоря отдельно для ДПТ и ГПТ.

#### Реакция якоря в ДПТ (рис. 3.5)

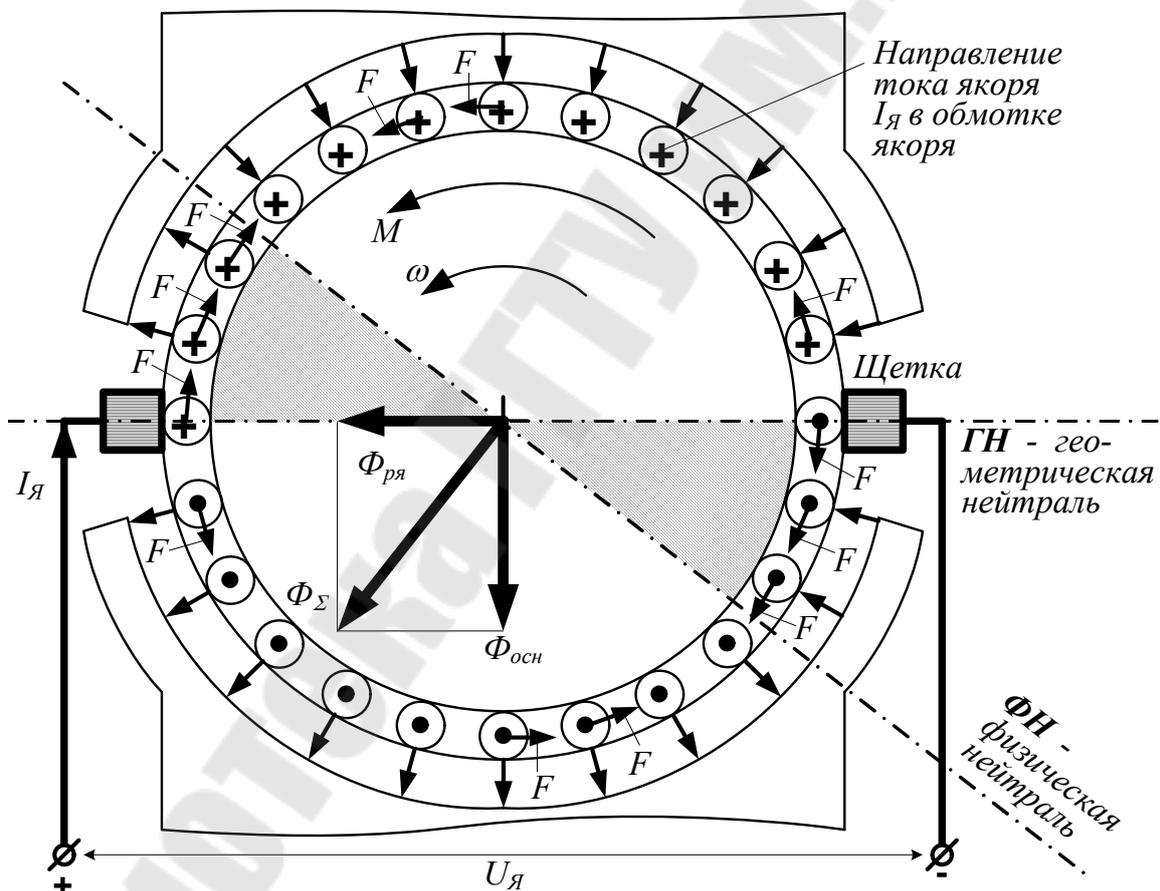


Рисунок 3.5 - Реакция якоря в ДПТ

Вектор основного магнитного потока  $\Phi_{осн}$ , созданного обмоткой возбуждения направлен вниз и перпендикулярен оси, на которой установлены щетки. Ось, проходящая через щетки, называется геометрической нейтралью – ГН.

Ток  $I_{я}$  в обмотке якоря создает магнитное поле якоря  $\Phi_{ря}$ , которое направлено влево. Его направление определено по правилу буравчика. Суммой двух полей  $\Phi_{осн}$  и  $\Phi_{ря}$  является поле  $\Phi_{\Sigma}$ . Линия перпендикулярная полю  $\Phi_{\Sigma}$  называется физической нейтралью –  $\Phi Н$ . Если поле  $\Phi_{\Sigma}$  разложить на составляющие поля вдоль зазора между полюсами статора и якорем по правилу, отображенному на рис. 3.4, б, то окажется:

- над  $\Phi Н$  линии магнитного поля зазора будут направлены к центру якоря;
- на линии  $\Phi Н$  поле зазора будет нулевым;
- под  $\Phi Н$  линии магнитного поля зазора будут направлены от центра якоря.

С учетом реакции якоря направление поля зазора в заштрихованных секторах изменится на противоположное. Этим полные магнитные потоки полюсов по их основному направлению уменьшатся, и такое явление называется размагничивающим действием реакции якоря. Направление тока  $I_{я}$  во всех проводниках обмотки якоря не изменится, так оно определяется исключительно полярностью якорного напряжения  $U_{я}$ . Если применить к проводникам якоря, расположенных в заштрихованных секторах, правило левой руки, то окажется, что механическая сила  $F$  в них будет направлена навстречу вращению якоря – по часовой стрелке. В не заштрихованной части ротора механическая сила будет вращать ротор против часовой стрелки. Суммарный момент, действующий на якорь, уменьшится в сравнении с моментом, развиваемым без учета поля  $\Phi_{ря}$ . Следовательно, реакция якоря ДПТ уменьшает его вращающий момент, а это ухудшение основной характеристики двигателя.

Из построений, приведенных на рис. 3.5, следует, что при реакции якоря в ДПТ происходит поворот  $\Phi Н$  относительно  $Г Н$  против направления вращения якоря. Это правило должно учитываться при практическом устранении отрицательного действия реакции якоря на вращающий момент ДПТ.

#### *Реакция якоря в ГПТ (рис. 3.6)*

Вектор основного магнитного потока  $\Phi_{осн}$ , созданного обмоткой возбуждения направлен вниз и перпендикулярен оси, на которой установлены щетки. Ось, проходящая через щетки, называется геометрической нейтралью –  $Г Н$ .

В уложенных в пазы проводниках обмотки якоря будут индуцироваться ЭДС  $E_{п}$ , направления которых определяется правилом правой руки. Сумма ЭДС  $E_{п}$  образует ЭДС  $E_{ГПТ}$ , которая подведена к щеткам. Направление тока якоря  $I_{я}$  нагруженного ГПТ будет совпадать с направлением суммарной ЭДС  $E$ . Ток  $I_{я}$  создает магнитное поле якоря  $\Phi_{ря}$ , которое направлено вправо. Его направление определено по правилу буравчика.

Суммой двух полей  $\Phi_{осн}$  и  $\Phi_{ря}$  является поле  $\Phi_{\Sigma}$ . Линия перпендикулярная полю  $\Phi_{\Sigma}$  называется физической нейтралью –  $\Phi Н$ . Распределение линий поля  $\Phi_{\Sigma}$  в зазоре будет отличающимся от распределения линий поля  $\Phi_{осн}$  (рис. 3.6):

- над  $\Phi Н$  линии магнитного поля зазора будут направлены к центру якоря;
- на линии  $\Phi Н$  поле зазора будет нулевым
- под  $\Phi Н$  линии магнитного поля зазора будут направлены от центра якоря.

С учетом изложенного направление поля зазора в заштрихованных секторах изменится на противоположное, что также как и в ДПТ отражает размагничивающее действие якоря. Вследствие изменения направления поля в заштрихованных секторах изменится на противоположное, направления ЭДС  $E_{\Pi}$  в проводниках пазов якоря, попавших в эти сектора. В не заштрихованной части ротора ЭДС  $E_{\Pi}$  не изменят направления и будет такой, как при работе ГПТ вхолостую. Суммарная ЭДС  $E$ , определяемая как алгебраическая сумма ЭДС в витках, ограниченных щетками, уменьшится в сравнении с суммой ЭДС без учета поля  $\Phi_{ря}$ . Следовательно, реакция якоря ГПТ уменьшает его ЭДС  $E$ , а это ухудшение основной характеристики генератора.

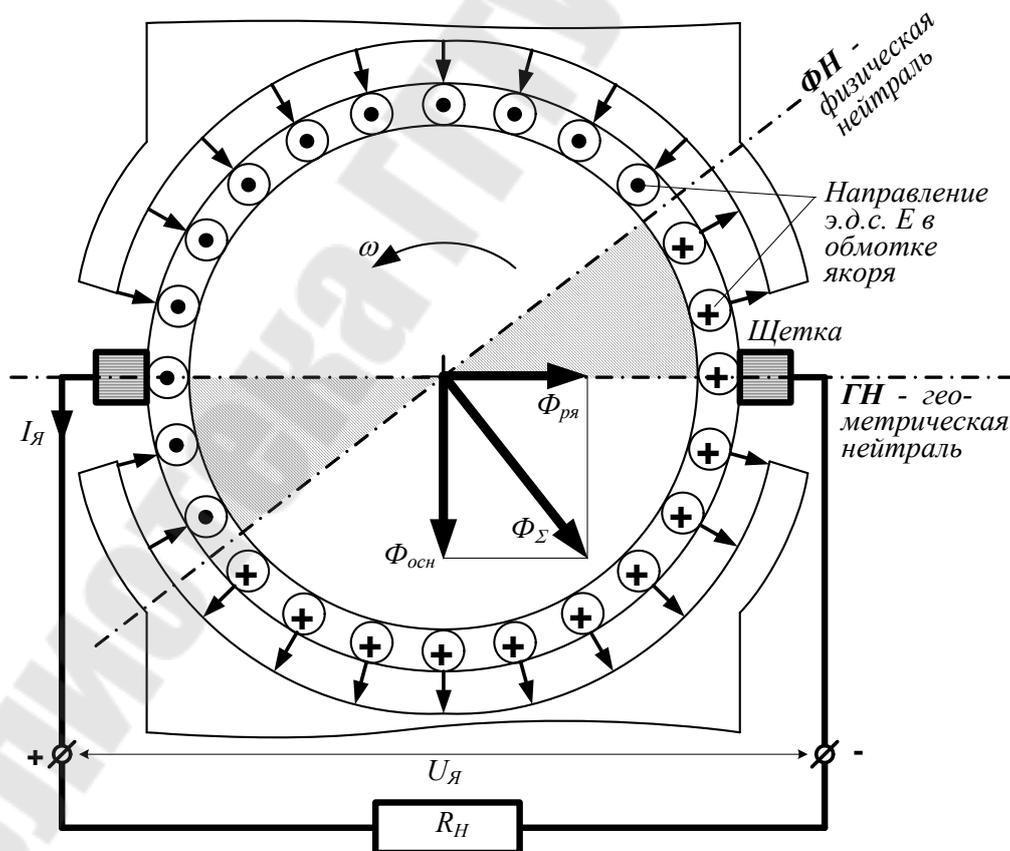


Рисунок 3.6 - Реакция якоря в ГПТ

Из построений, приведенных на рис. 3.6, следует, что при реакции якоря в ГПТ происходит поворот нейтрали по направлению вращения якоря. Это правило важно для практического устранения отрицательного действия реакции якоря на величину ЭДС ГПТ.

### **Компенсация реакции якоря в МПТ**

Влияние реакции якоря как на ДПТ, так и на ГПТ, отрицательное, так как у ДПТ понижается вращающий момент, а ГПТ понижается ЭДС  $E$  и, следовательно, напряжение  $U_{я}$  на нагрузке.

Если ДПТ или ГПТ работают со стабильной нагрузкой, то реакцию якоря можно скомпенсировать путем поворота траверсы, на которой установлены щетки:

- у ДПТ траверсу щеток нужно поворачивать против вращения якоря;
- у ГПТ траверсу щеток нужно поворачивать по вращению якоря.

Если ДПТ или ГПТ работают с изменяющейся в больших пределах нагрузкой, то реакцию якоря можно скомпенсировать установкой на статоре МПТ дополнительных полюсов (рис. 3.7).

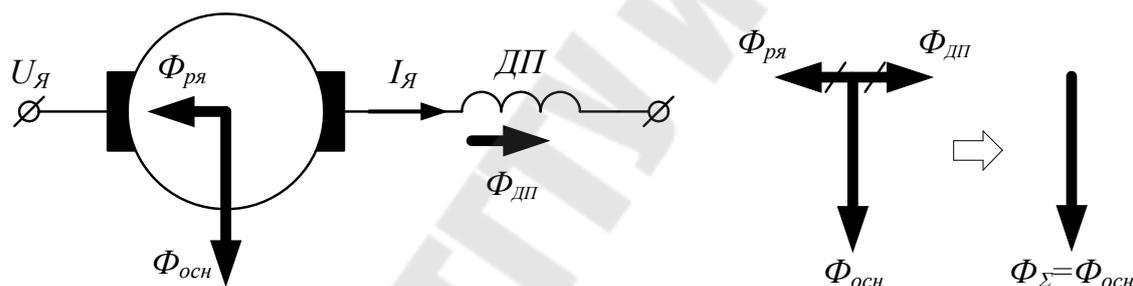


Рисунок 3.7 - Компенсация реакции якоря дополнительными полюсами (ДП)

Между основными полюсами статора на оси геометрической нейтрали устанавливаются сердечники дополнительных полюсов ДП, и на них наматывается катушка из толстого провода, выдерживающего большой ток якоря (десятки – тысячи ампер). ДП создают вдоль оси геометрической нейтрали поле  $\Phi_{ДП}$ . Поле реакции якоря также направлено вдоль оси геометрической нейтрали (см. рис. 3.5 и 3.6). Параметры катушки ДП (размеры полюса, количество витков катушки) выбираются такими, чтобы поле  $\Phi_{ДП}$  было равно полю  $\Phi_{ря}$ . Тогда в сумме трех полей –  $\Phi_{осн}$ ,  $\Phi_{ря}$  и  $\Phi_{ДП}$  – сумма полей  $\Phi_{ря}$  и  $\Phi_{ДП}$  будет нулевой, суммарное поле  $\Phi_{\Sigma}$  будет равно полю  $\Phi_{осн}$ . Реакция якоря полностью скомпенсирована и эта компенсация действует при любой нагрузке ДПТ или ГПТ.

## Вопросы и задания

1. Что называется реакцией якоря у МПТ?
2. К каким отрицательным последствиям приводит реакция якоря у ДПТ?
3. К каким отрицательным последствиям приводит реакция якоря у ГПТ?
4. Поясните принцип компенсации реакции якоря с помощью дополнительных полюсов.

### 3.4 Магнитодвижущие силы и ЭДС обмоток МПТ

*Рассмотрим ГПТ.*

Обмотка якоря ГПТ состоит из многовитковых секций, уложенных в пазы ротора. Каждая секция подключена к смежным пластинам коллектора. К коллектору прилегают щетки (рис. 3.8). Чтобы снять с обмотки якоря во внешнюю цепь максимальное напряжение, необходимо:

- секции соединить последовательно, чтобы обеспечить суммирование индуктируемых в секциях ЭДС  $E$ ;
- наложить щетки на те пластины коллектора, между которыми напряжение минимальное, чтобы уменьшить искрение щеточно-коллекторного узла.

Такие смежные пластины при холостом ходе ГПТ расположены на физической нейтрали (рис. 3.6), а при наличии дополнительных полюсов (рис. 3.7) – на геометрической нейтрали.

Обмотками возбуждения, заканчивающимися фигурными полюсными наконечниками (рис. 3.2 и 3.3), в зазоре между полюсами и якорем реальное поле (рис. 3.8), которое:

- в пределах наконечников значение индукции поля  $B_x$  практически постоянное;
- на участках якоря, расположенных между полюсами индукция магнитного поля  $B_x$  непрерывно изменяется от максимальной одного знака (под северным полюсом  $N$ ) до максимальной другого знака (под южным полюсом  $S$ ).

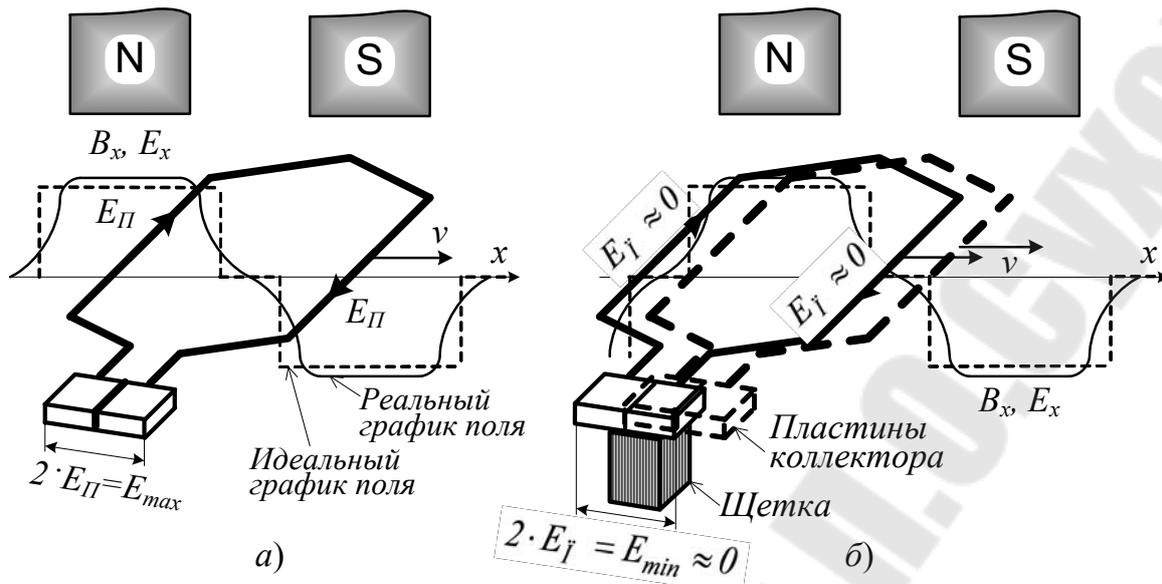


Рисунок 3.8 - Графики распределения индукции магнитного поля возбуждения  $B_x$  и э.д.с.  $E_x$  между соседними пластинами коллектора при расположении проводников якоря под полюсами (а) и между полюсами (б)

Рамки секций якорной обмотки имеют ширину, практически равную расстоянию между центрами полюсов. Концы секции выведены на смежные пластины. Рамка перемещается относительно полюсов со скоростью  $v$ . Если сторона рамки перемещается в магнитном поле с индукцией  $B_x$ , то в ней индуцируется ЭДС  $E_x$  прямо пропорциональная индукции  $B_x$  (3.4). Значит графики ЭДС  $E_x$  и индукции  $B_x$  подобные по форме (на рис. 3.8 эти графики показаны совпадающими, что возможно после выбора соответствующего масштаба для графика  $E_x$ ).

В секциях якорной обмотки, которые перемещаются под полюсами, индуцируется максимальная ЭДС  $E_{max}$  (рис. 3.8, а), а перемещающихся в межполюсном промежутке ЭДС минимальная  $E_{min}$  (рис. 3.8, б).

При вращении якоря щетками неизбежно будут происходить замыкания накоротко смежных коллекторных пластин, что приведет к протеканию в щетке и пластинах коллектора тока короткого замыкания. Очевидно, что для уменьшения тока короткого замыкания и, соответственно, искрения щеточно-коллекторного узла, щетки должны прилегать к той паре смежных пластин коллектора, на которые выведена секция, стороны которой перемещающихся в межполюсном промежутке. Значит, щетки должны располагаться точно под центрами полюсов.

Другие секции якорной обмотки, к пластинам коллектора которых не прижаты щетки, должны быть соединены последовательно, чтобы ЭДС  $E_{П}$  проводников секций суммировались, что позволит снять с ГПТ максимальную ЭДС  $E$ . Это достигается соответствующими схемами укладки обмотки в пазы якоря.

*Рассмотрим ДПТ.*

В уравнении (3.5) цепи якоря ДПТ величина падения напряжения  $R_{\text{я}}I_{\text{я}}$  на сопротивлении  $R_{\text{я}}$  проводников обмотки намного меньше (около 2...5%) значений подведенного напряжения  $U_{\text{я}}$  и ЭДС вращения  $E$ . Поэтому, можно считать, что  $U_{\text{я}} = E$ . Так как ЭДС  $E$  равна сумме ЭДС  $E_{\text{п}}$ , индуцируемых в уложенных в пазы проводниках обмотки якоря, то распределение подведенного извне якорного напряжения  $U_{\text{я}}$  между смежными пластинами коллектора будет в точности повторять распределение ЭДС  $E$ . Для уменьшения искрения щеточно-коллекторного узла, щетки должны прилегать к той паре смежных пластин коллектора, на которые выведена секция, стороны которой перемещающихся в межполюсном промежутке. Значит, щетки должны располагаться точно под центрами полюсов.

Другие секции якорной обмотки, к пластинам коллектора которых не прижаты щетки, должны быть соединены так, чтобы протекающие по ним токи в пределах полюсных наконечников с ГПТ имели одно и то же направление, что обеспечит получение от ДПТ максимального вращающего момента. Это достигается соответствующими схемами укладки обмотки в пазы якоря.

Таким образом, требования к выбору места установки щеток для ГПТ и ДПТ совпали. Также определены требования к исполнению якорной обмотки ГПТ и ДПТ.

### **Вопросы и задания**

1. Какие требования к обмотке якоря и к установке щеток должны быть выполнены, чтобы можно было снять с обмотки якоря ГПТ во внешнюю цепь максимальное напряжение?
2. Какие требования к обмотке якоря и к установке щеток должны быть выполнены, чтобы можно было снять с обмотки якоря ГПТ во внешнюю цепь максимальное напряжение?

### **3.5 Уравнение коммутации МПТ, виды коммутация.**

#### ***Средства улучшения коммутации***

Коммутацией называется процесс изменения тока в секциях обмотки якоря при переходе щетки с одной коллекторной пластины на другую смежную с ней (рис. 3.9). Если щетки искрят, то МПТ имеет плохую коммутацию, а если искрение отсутствует, то коммутацию называют хорошей.

Причины искрения щеток разбиваются на две группы: механические и электромагнитные.

К механическим причинам относятся:

- биение коллектора, вызванное его эллиптичностью;
- шероховатость рабочей поверхности коллектора;
- наличие выступающих коллекторных пластин и изоляционных прокладок;
- вибрация щеткодержателей или заедание щеток в них;
- износ и ослабление прижимных пружин и др.

Электромагнитные причины проявляются в процессе перемещения щетки по коллектору, в результате которого происходит как замыкание секции, когда щетка перекрывает две и более пластины, так и разрыв цепи в момент схода щетки со смежной пластины. Затраты на эксплуатацию щеточно-коллекторного узла велики и в год достигают 1/3 стоимости самой МПТ.

Рассмотрим электромагнитные причины искрения щеток.

Пусть вначале щетка прижималась к пластине 1 коллектора (рис. 3.9, а). Ток  $i_1$  в петушке (петушкой называется место подключения вывода секции обмотки якоря к коллекторной пластине) секции  $K_1$  обмотки якоря равен току якоря  $I_я$ , а ток  $i_2$  в петушке пластины 2 нулевой. Направления токов  $i_{11}$ ,  $i_{12}$ ,  $i_{21}$  и  $i_{22}$  в сторонах секций  $K_1$  и  $K_2$  проставлены на рисунке. Пусть вращающийся якорь перемещается со скоростью  $v$  относительно неподвижной щетки справа-налево. Началом процесса коммутации является момент, когда щетка коснется пластины 2, оставаясь в контакте с пластиной 1. Окончанием процесса коммутации является момент, когда обрывается контакт щетки с пластиной 1 и щетка сцепляется только с пластиной 2 (рис. 3.9, в). Теперь ток  $i_1$  в петушке секции  $K_1$  обмотки якоря будет нулевым, а ток  $i_2$  в петушке пластины 2 будет равен току якоря  $I_я$ . Направления токов  $i_{11}$ ,  $i_{12}$ ,  $i_{21}$  и  $i_{22}$  в сторонах секций  $K_1$  и  $K_2$  проставлены на рисунке.

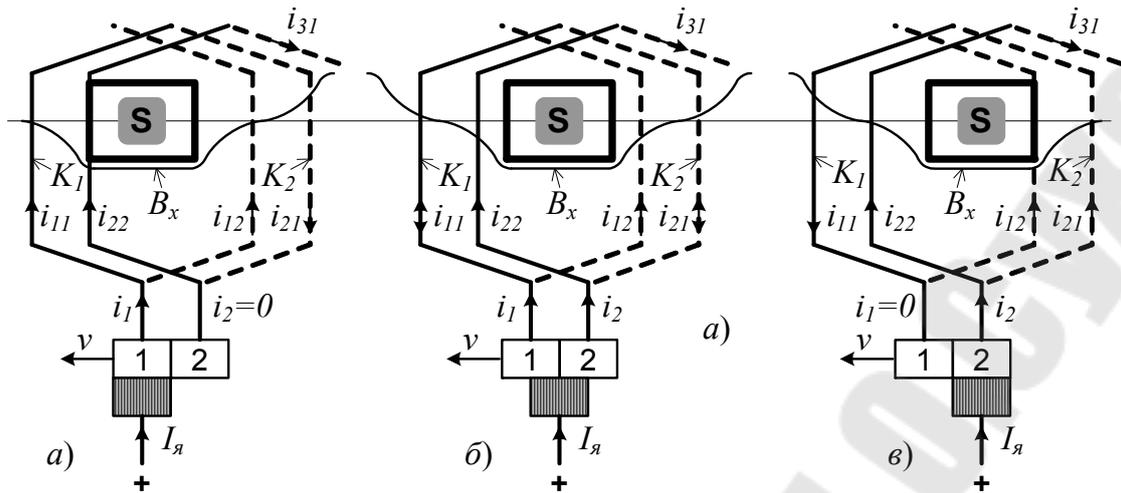


Рисунок 3.9 - Процесс коммутации при перемещении коллекторных пластин 1-2 относительно щетки в последовательности (а) → (б) → (в)

Из сопоставления рис. 3.9, а и в видно, что направления токов  $i_{11}$  и  $i_{21}$  изменилось на противоположное, а направления токов  $i_{12}$  и  $i_{22}$  не изменилось. Смена направлений токов  $i_{11}$  и  $i_{21}$  сопровождается индуктированием в соответствующих сторонах секций ЭДС:

$$e_{11} = L \frac{di_{11}}{dt}, \quad e_{21} = L \frac{di_{21}}{dt}.$$

Так как токи  $i_{11}$  и  $i_{21}$  на рис.3.9,а и рис.3.9,в являются одним и тем же током, то производные от них совпадающие и индукционная ЭДС  $e_u$  в секции, подключенной к пластинам 1 и 2 равна сумме найденных ЭДС  $e_{11}$  и  $e_{21}$ :

$$e_u = 2L \frac{di_{11}}{dt} = 2L \frac{di_{21}}{dt}. \quad (3.10)$$

На рис. 3.11 показан наконечник магнитного полюса, например, южного  $S$ , и график индукции  $B_x$  магнитного поля в зазоре (плоская часть графика) и в межполюсном промежутке (наклонные части). Площадь, ограниченная графиком  $B_x$  и осью нулевого значения  $B_x$ , является величиной магнитного потока  $\Phi$ . На рис. 3.9, а магнитный поток контура  $\Phi K_1$  максимальный и имеет направление южного  $S$  полюса. Магнитный поток контура  $\Phi K_2$  в целом имеет направление южного  $S$  полюса, но его величина будет меньше  $\Phi K_1$ . На рис. 3.9, в магнитный поток контура  $\Phi K_2$  будет южным  $S$  и максимальным, а магнитный поток контура  $\Phi K_1$  в целом имеет направление южного  $S$  полюса, но его величина будет меньше  $\Phi K_2$ . Зна-

чит при перемещении контуров  $K_1$  и  $K_2$  в них будет наводиться ЭДС вращения  $e_B$ .

Сумма ЭДС  $e_H$  и  $e_B$ , приложенная к секции, подключенной к пластинам 1 и 2 коллектора, вызовет в этой секции переходный процесс изменения токов  $i_{11}$  и  $i_{21}$ , который ввиду их тождественности обозначим как ток  $i$ . Уравнения переходного процесса составляем для схемы, изображенной на рис. 3.9, б, в которой как раз и происходят изменения направления токов  $i_{11}$  и  $i_{21}$ . Уравнение имеет вид:

$$e_H + e_B = R_{щ1}i_1 + R_C i - R_{щ2}i_2, \quad (3.11)$$

где  $R_{щ1}$  и  $R_{щ2}$  – сопротивления скользящих контактов между щеткой и пластинами коллектора;  $R_C$  – сопротивление проводников секции.

Обычно значения  $e_H$  и  $e_B$  намного превосходят  $R_{щ1}i_1 + R_C i - R_{щ2}i_2$ , и, поэтому, простейшее уравнение коммутации можно принять следующим:

$$e_H + e_B = 0$$

или с учетом (3.10):

$$2L \frac{di}{dt} = -e_B. \quad (3.12)$$

Решением уравнения (3.12) является закон изменения тока в процессе коммутации в МПТ:

$$i = -\frac{1}{2L} \int e_B dt + C, \quad (3.13)$$

где  $T_K$  – время коммутации, равное времени перемещения щетки с пластины 1 на пластину 2.

Если в процессе коммутации ЭДС  $e_B$  была постоянной, то интеграл (3.13) примет вид

$$i = -\frac{e_B}{2L} t + C. \quad (3.14)$$

Подставляем в (3.14) граничные условия, получаем систему уравнений

$$i(0) = -\frac{e_B}{2L} 0 + C = I_{Я}, \quad i(T_K) = -\frac{e_B}{2L} T_K + C = -I_{Я},$$

откуда находим:

$$C = I_{\text{я}} \quad \text{и} \quad \frac{e_B}{2L} = \frac{2I_{\text{я}}}{T_K}. \quad (3.15)$$

Подставляем найденное (3.15) в (3.14) и получаем окончательно

$$i = I_{\text{я}} \left( 1 - \frac{2}{T_K} t \right). \quad (3.16)$$

Выражение (3.16) описывает идеальную прямолинейную коммутацию (рис. 3.10, график 2), при которой в момент схода щетки с пластины  $I$  ток в петушке этой пластины будет нулевым (рис. 3.9, в) и, поэтому, искрения щетки не будет.

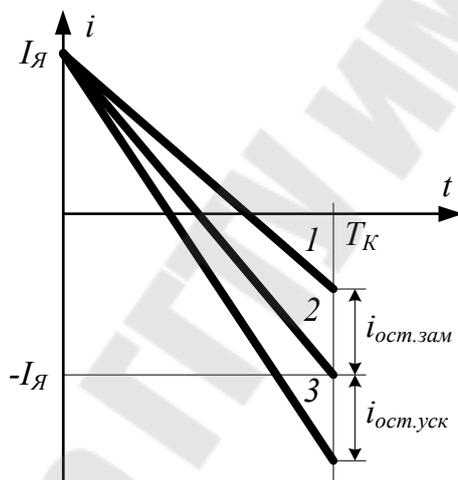


Рисунок 3.10 - Переходные процессы при замедленной (1), идеальной (2) и ускоренной (3) коммутации

Если ЭДС  $e_B$  будет так изменяться, что ток  $i$  не успеет обратиться в ноль (останется остаточный ток  $i_{\text{ост.зам}}$ ), то в момент схода щетки с пластины 1 возникнет искра. Такая коммутация называется замедленной (рис. 3.10, график 1). Если ЭДС  $e_B$  будет так изменяться, что она в момент схода щетки с пластины создаст ток остаточный ток  $i_{\text{ост.уск}}$  обратного направления (в сравнении с замедленной коммутацией) и также в момент схода щетки с пластины 1 возникнет искра. Такая коммутация называется ускоренной (рис. 3.10, график 3).

Основным средством улучшения коммутации является применение дополнительных полюсов (рис. 3.7). Этим снижается величина ЭДС  $e_B$  и,

соответственно, величины остаточного тока  $i_{ост}$  как замедленной, так и ускоренной коммутации. Искрение под щеткой становится малым.

В машинах большой мощности устанавливают еще компенсационную обмотку. Укладывают ее в пазы, нарезанные в торце полюсного наконечника, обращенного к якору.

### Вопросы и задания

1. Поясните электромагнитные причины искрения щеток.
2. Поясните смысл ЭДС  $e_{II}$  и  $e_B$ .
3. Составьте уравнение коммутации и найдите его решения для случая идеальной прямолинейной коммутации.
4. Что представляет собой замедленная и ускоренная коммутация и почему при этих коммутациях возникает искрение щеток?
5. Какие существуют методы устранения причин механического и электромагнитного искрения щеток?

### 3.6 Двигатель параллельного возбуждения и его рабочие характеристики

Якорь  $Я$  и обмотка возбуждения  $ОВ$  подключены параллельно к источнику постоянного напряжения  $U$  через регулировочные дополнительные сопротивления  $R_{ДЯ}$  и  $R_{ДВ}$  (рис. 3.11). Такой ДПТ называют также шунтовым. Двигатель вращается с частотой  $\omega$  и развивает на валу вращающий момент  $M$ .

Уравнение обмотки возбуждения

$$U = (R_{ОВ} + R_{ДВ}) I_B. \quad (3.17)$$

Уравнения цепи якоря в переходном и установившемся режимах:

$$U = e + (R_{Я} + R_{ДЯ}) i_{Я} + L_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} \quad \text{и} \quad U = E + (R_{Я} + R_{ДЯ}) I_{Я}, \quad (3.18)$$

где  $e$  либо  $E$  – ЭДС вращения ДПТ, определяемая по выражению (3.6).

Уравнение цепи якоря (3.18) для установившегося режима с учетом (3.6)

$$U = c_{\phi} \omega + (R_{Я} + R_{ДЯ}) I_{Я}, \quad (3.19)$$

где  $c_\Phi$  – коэффициент магнитного потока ОВ, который пропорционален току  $I_B$  в ней, определяемый согласно (3.17):

$$c_\Phi = k_{OB} I_B = \frac{k_{OB} U}{R_{OB} + R_{ДВ}}, \quad (3.20)$$

где  $k_{OB}$  – конструктивный коэффициент обмотки возбуждения.

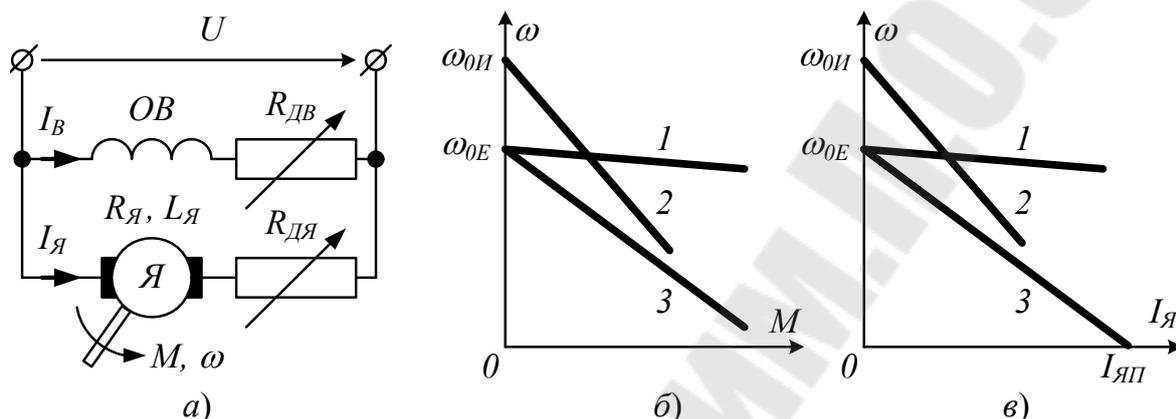


Рисунок 3.11 - Схема включения ДПТ с параллельным возбуждением (а), механическая (б) и электромеханическая (в) характеристики

Решением уравнения (3.19) относительно  $\omega$  является электромеханическая характеристика (ЭМХ) ДПТ:

$$\omega = \frac{U}{c_\Phi} - \frac{R_Я + R_{ДЯ}}{c_\Phi} I_Я, \quad (3.21)$$

показывающая зависимость частоты вращения  $\omega$  ДПТ от тока якоря  $I_Я$ .

Если ДПТ не нагружен (работает вхолостую), то ток якоря  $I_Я$  нулевой, а частота вращения  $\omega$  называется частотой  $\omega_0$  холостого хода, которая согласно (3.21) равна

$$\omega_0 = \frac{U}{c_\Phi}. \quad (3.22)$$

После замены в (3.21) тока якоря  $I_Я$  на найденное из (3.9) значение  $I_Я = \frac{M}{c_\Phi}$ , получим механическую характеристику (МХ) ДПТ:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д\text{я}}}}{c_{\text{ф}}^2} M, \quad (3.23)$$

МХ показывает зависимость частоты вращения  $\omega$  ДПТ от вращающего момента  $M$ .

ЭМХ и МХ, определяемые выражениями (3.21) и (3.23), являются прямыми линиями (рис. 3.11, б, в).

Если напряжение питания  $U$  схемы номинальное  $U_{\text{ном}}$  и ОВ и якорь подключены к питанию напрямую без дополнительных сопротивлений  $R_{\text{дв}}$  и  $R_{\text{д\text{я}}}$ , то ЭМХ и МХ называются естественными (графики 1 на рис. 3.11, б, в), а частота холостого хода  $\omega_{0\text{Е}}$  называется естественной. Коэффициенты наклона естественных ЭМХ и МХ согласно (3.21) и (3.23) равны

$$k_{\text{ЭМХ.Е}} = \frac{R_{\text{я}}}{c_{\text{ф}}} \quad \text{и} \quad k_{\text{МХ.Е}} = \frac{R_{\text{я}}}{c_{\text{ф}}^2}. \quad (3.24)$$

Если напряжение питания  $U$  схемы номинальное  $U_{\text{ном}}$  и ОВ и якорь подключены к питанию через дополнительные сопротивления  $R_{\text{дв}}$  и  $R_{\text{д\text{я}}}$ , то ЭМХ и МХ называются искусственными (графики 2 и 3 на рис. 3.11, б, в). Частота холостого хода при номинальном возбуждении (сопротивление  $R_{\text{дв}}$  выведено) равна естественной  $\omega_{0\text{Е}}$  (графики 3 на рис. 3.11, б, в). При введении сопротивления  $R_{\text{дв}}$  ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  в соответствии с (3.17) понижается и снижается коэффициент магнитного потока  $c_{\text{ф}}$  (3.20). Частота холостого хода  $\omega_0$  становится больше  $\omega_{0\text{Е}}$  (3.22) и называется она частотой холостого хода  $\omega_{0\text{И}}$  искусственной характеристики (графики 2 на рис. 3.11, б, в).

Коэффициенты наклона естественных ЭМХ и МХ согласно (3.24) увеличиваются как при введении сопротивления  $R_{\text{д\text{я}}}$  (числители формул (3.24), так и при введении  $R_{\text{дв}}$ , так как ослабляется магнитный поток и уменьшается коэффициент потока  $c_{\text{ф}}$  (3.20).

Ток якоря  $I_{\text{я}}$  в момент пуска, определяемый из ЭМХ при частоте  $\omega=0$ , называется пусковым  $I_{\text{яп}}$ . При прямом пуске ДПТ на естественной характеристике (без сопротивления  $R_{\text{д\text{я}}}$ ), пусковой ток  $I_{\text{яп}}$  в 5...40 раз превышает номинальный ток якоря  $I_{\text{я.ном}}$ . Этот ток намного превышает допустимый, равный (2...3)  $I_{\text{я.ном}}$ , по условиям возникновения опасного искрения щеточного узла якоря.

Если обмотка возбуждения и якорь получают питание от двух независимых источников постоянного напряжения, то ДПТ является двигателем с независимым возбуждением. Для него ЭМХ и МХ такие же, как и для ДПТ с параллельным возбуждением.

## Вопросы и задания

1. Составьте уравнения цепи обмотки возбуждения и якоря.
2. Выведите выражения ЭМХ и МХ ДПТ.
3. Какие характеристики ДПТ называются естественными, а какие искусственными?
4. Как влияют дополнительные сопротивления  $R_{ДЯ}$  и  $R_{ДВ}$  на наклон и частоту холостого хода ЭМХ и МХ?

### 3.7 Двигатель последовательного возбуждения и его рабочие характеристики

В двигателе с последовательным возбуждением (серийном ДПТ) основной магнитный поток создается обмоткой возбуждения, которая включена последовательно с якорем и по которой протекает ток якоря  $I_{Я}$  (рис. 3.12, а).

Уравнение цепи якоря серийного ДПТ, выражения ЭДС вращения  $e$ , момента  $M$ , а также ЭМХ и МХ ДПТ по структуре такие же, как у шунтового:

$$U_{Я} = c_{\Phi}(I_{Я})\omega + (R_{Я} + R_{ОВ})I_{Я} \Rightarrow \omega = \frac{U_{Я}}{c_{\Phi}(I_{Я})} - \frac{R_{Я} + R_{ОВ}}{c_{\Phi}(I_{Я})}I_{Я} - \text{ЭМХ},$$

$$M = c_{\Phi}(I_{Я}) \cdot I_{Я} \Rightarrow I_{Я} = f(M) - \text{определение момента}, \quad (3.25)$$

$$\omega = \frac{U_{Я}}{c_{\Phi}(f(M))} - \frac{R_{Я} + R_{ОВ}}{c_{\Phi}(f(M))}f(M) - \text{МХ}.$$

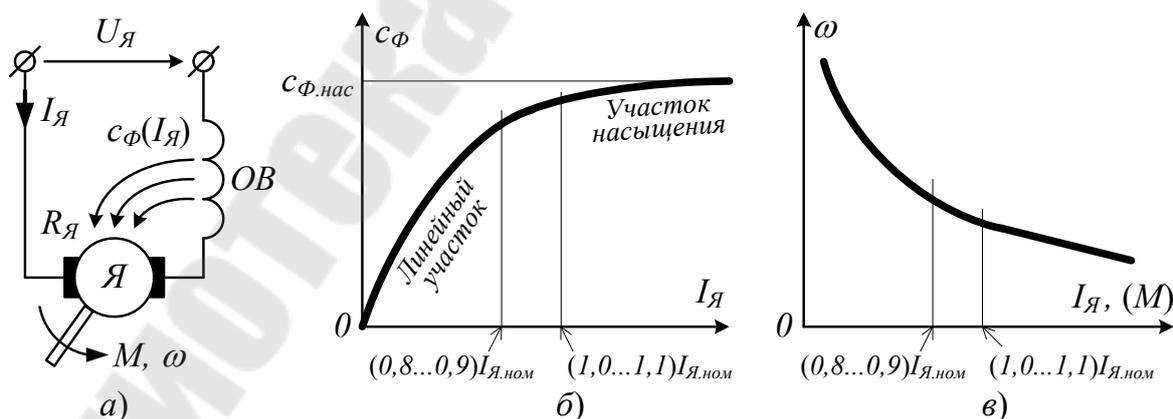


Рисунок 3.12 - Схема включения ДПТ с последовательным возбуждением (а), характеристика намагничивания (б) и электромеханическая характеристика (в)

Для конкретизации зависимостей

$$c_{\phi}(I_{Я}), \quad M = c_{\phi}(I_{Я}) \cdot I_{Я} \quad \text{и} \quad I_{Я} = f(M) \quad (3.26)$$

и, в последующем, формы ЭМХ и МХ нужно учесть нелинейный вид кривой намагничивания магнитопровода основных полюсов (рис. 3.12, б). Для тока  $I_{Я}$  якоря в интервале от нуля до  $(0,7...0,9) I_{Я.ном}$  коэффициент потока  $c_{\phi}$  практически прямо пропорционален току  $I_{Я}$ , т.е.  $c_{\phi} = k_{\phi} I_{Я}$ . Для тока  $I_{Я}$  якоря в интервале  $(1,0...1,1) I_{Я.ном}$  коэффициент потока  $c_{\phi}$  практически не меняется, достигнув своего насыщенного значения  $c_{\phi.нас}$ .

Расчет и построение ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода ДПТ.

Для линейного участка с  $I_{Я} > (1,0...1,1) I_{Я.ном}$  зависимости (3.26) принимают вид:

$$c_{\phi}(I_{Я}) = k_{\phi} I_{Я}, \quad M = k_{\phi} I_{Я}^2 \quad \text{и} \quad I_{Я} = f(M) = \sqrt{\frac{M}{k_{\phi}}}. \quad (3.27)$$

Подставляем (3.27) в выражения ЭМХ и МХ, представленные в (3.25), и получаем:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{U_{Я}}{k_{\phi} I_{Я}} - \frac{R_{Я} + R_{ОВ}}{k_{\phi}} \quad - \quad \text{ЭМХ}, \\ \omega &= \frac{U_{Я}}{\sqrt{k_{\phi} M}} - \frac{R_{Я} + R_{ОВ}}{k_{\phi}} \quad - \quad \text{МХ}. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Графиками ЭМХ и МХ являются гиперболы (рис. 3.12, в).

Расчет и построение ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода ДПТ.

Для насыщенного участка зависимости (3.26) принимают вид:

$$c_{\phi}(I_{Я}) = c_{\phi.нас}, \quad M = c_{\phi.нас} I_{Я} \quad \text{и} \quad I_{Я} = f(M) = \frac{M}{c_{\phi.нас}}. \quad (3.29)$$

Подставляем (3.29) в выражения ЭМХ и МХ, представленные в (3.25), и получаем:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{c_{\text{Ф.нас}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ОВ}}}{c_{\text{Ф.нас}}} I_{\text{я}} \quad - \quad \text{ЭМХ},$$

$$\omega = \frac{U_{\text{я}}}{c_{\text{Ф.нас}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{ОВ}}}{c_{\text{Ф.нас}}^2} M \quad - \quad \text{МХ}.$$
(3.30)

Графиками ЭМХ и МХ являются прямые линии (рис. 3.12, в).

### **Анализ ЭМХ и МХ серийного ДПТ**

В диапазоне допустимой нагрузки длительного режима работы серийного ДПТ механические характеристики являются мягкими и имеют гиперболический вид. Это приводит к значительному изменению частоты вращения  $\omega$  при изменении механической нагрузки на валу. При малых нагрузках частота вращения  $\omega$  резко возрастает и может превысить максимально допустимое значение – двигатель идет в "разнос". Поэтому серийные ДПТ нельзя применять для привода механизмов, которые могут работать без нагрузки. Обычно минимально допустимая нагрузка составляет  $(0,2 \dots 0,25)M_{\text{ном}}$ .

Несмотря на указанный недостаток серийные ДПТ для получения некоторого значения момента  $M$  потребляют ток  $I_{\text{я}}$  меньший, чем в тех же условиях потребляет шунтовой ДПТ. Например, если вращающий момент  $M$  нужно увеличить в 4 раза, то у шунтового ДПТ ток  $I_{\text{я}}$  должен быть увеличен также в 4 раза, а у серийного ДПТ ток  $I_{\text{я}}$  в соответствии с (3.27) увеличится только в 2 раза. За это свойство значительного увеличения момента при умеренном увеличении потребления тока серийные ДПТ называют тяговыми двигателями.

### **Вопросы и задания**

1. Приведите выражения ЭМХ и МХ в общем виде.
2. Приведите выражения ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
3. Приведите выражения ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.
4. Какие недостатки и достоинства имеют серийные ДПТ?

### **3.8 Двигатель смешанного возбуждения и его рабочие характеристики**

Двигатель смешанного возбуждения, называемый также компаундным ДПТ, содержит шунтовую и серийную обмотки возбуждения

(рис. 3.13, а). Совместным действием обоих обмоток возбуждения создается суммарный поток:

а)  $\Phi_{OB} = \Phi_{Ш} \pm \Phi_C$  – для ДПТ параллельно-последовательного возбуждения, если поток  $\Phi_{Ш}$  шунтовой обмотки больше потока  $\Phi_C$  серийной ( $\Phi_{Ш} > \Phi_C$ );

б)  $\Phi_{OB} = \Phi_C + \Phi_{Ш}$  – для ДПТ последовательно-параллельного возбуждения, если поток  $\Phi_C$  серийной обмотки больше потока  $\Phi_{Ш}$  шунтовой ( $\Phi_C > \Phi_{Ш}$ ).

У первого типа ДПТ возможно как согласное включение шунтовой и серийной обмоток (потoki  $\Phi_{Ш}$  и  $\Phi_C$  складываются), так и встречное (потoki  $\Phi_{Ш}$  и  $\Phi_C$  вычитаются). У второго типа ДПТ применяется только согласное включение шунтовой и серийной обмоток (потoki  $\Phi_C$  и  $\Phi_{Ш}$  складываются).

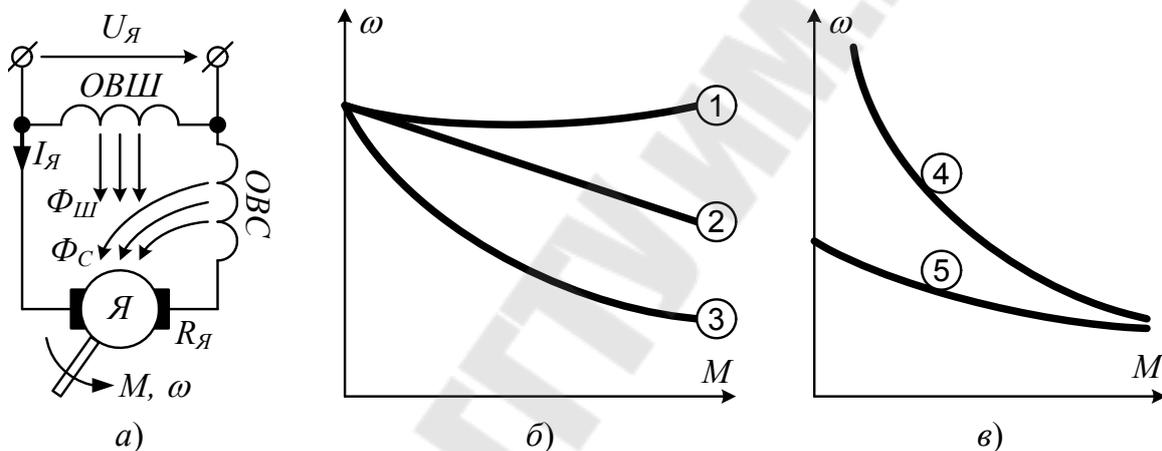


Рисунок 3.13 - Схема включения ДПТ со смешанным возбуждением (а), механические характеристика ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением (б) и с последовательно-параллельным (в)

### **ДПТ параллельно-последовательного возбуждения**

Механическая характеристика, созданная основной, шунтовой обмоткой является прямой линией 2 (рис. 3.13, б).

При согласном включении шунтовой и серийной обмоток ( $\Phi_{OB} = \Phi_{Ш} + \Phi_C$ ) суммарный магнитный поток  $\Phi_{OB}$  превышает поток шунтовой  $\Phi_{Ш}$ . Так как в выражения МХ магнитный поток входит в знаменатель обоих слагаемых (формулы (3.23) и (3.25)), то результирующая МХ 3 проходит ниже характеристики 2. Кроме того МХ серийной обмотки является мягкой и, поэтому, результирующая МХ 3 также мягче МХ 2.

При встречном включении шунтовой и серийной обмоток  $\Phi_{OB} = \Phi_{Ш} - \Phi_C$  суммарный магнитный поток  $\Phi_{OB}$  меньше потока шунтового  $\Phi_{Ш}$ . Так как в выражения МХ магнитный поток входит в знаменатель

обоих слагаемых (формулы (3.23) и (3.25)), то результирующая МХ 1 проходит выше характеристики 2. Кроме того, МХ серийной обмотки является мягкой и вычитается из МХ шунтовой обмотки, поэтому результирующая МХ 1 также жестче МХ 2.

Согласное включение ОВШ и ОВС применяют для повышения нагрузочной способности ДТ при незначительном увеличении тока якоря. Встречное включение ОВШ и ОВС применяют для увеличения жесткости МХ, что позволяет практически стабилизировать частоту вращения ДПТ при изменении нагрузки в широких пределах изменения механической нагрузки двигателя.

### ***ДПТ последовательно-параллельного возбуждения***

Механическая характеристика, созданная основной, серийной обмоткой является гиперболой 4 (рис. 3.13, в). Согласно включение шунтовой обмотки позволяет исключить снижение результирующего потока  $\Phi_{ОВ}$  до нуля при значительной разгрузке ДПТ по моменту. Это позволяет избежать "разноса" ДПТ (МХ 5 на рис. 3.13, в).

Компаундные ДПТ с МХ типа 5 применяют преимущественно в электротранспорте, как обладающие наилучшими тяговыми свойствами.

### **Вопросы и задания**

1. Какие способы включения шунтовой и серийной обмоток применяют в компаундном ДПТ?
2. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением.
3. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с последовательно-параллельным возбуждением.

### **3.9 Способы пуска ДПТ**

Существуют три основных способа пуска ДПТ:

1. Прямой пуск.
2. Разгон с пусковым сопротивлением в цепи якоря.
3. Разгон с плавным повышением якорного напряжения.

Критериями выбора способа пуска являются:

- ограничение тока во время разгона ДПТ на уровне, который является безопасным для щеточно-коллекторного узла;
- получение большого вращающего момента на всем интервале разгона.

Ограничение тока снижает искрение щеток и коллектора, чем продлевается ресурс эксплуатации ДПТ. Повышение вращающего момента ДПТ сокращает время разгона ДПТ с неподвижного состояния до номинальной частоты вращения, что сокращает время, в течение ток ДПТ был выше номинальным и, следовательно, уменьшает разогрев обмоток и наиболее чувствительной его части – изоляции обмоток. Этим также продлевается ресурс эксплуатации ДПТ.

### **Прямой пуск**

Схема прямого пуска приведена на рис. 3.14.

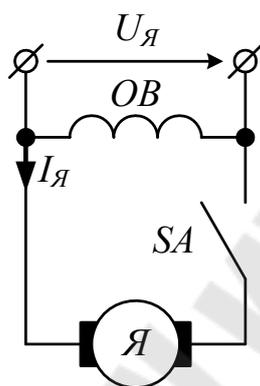


Рисунок 3.14 - Схема прямого пуска ДПТ

Обмотка возбуждения ОВ предварительно подключается к питающему напряжению  $U_{я}$ . По истечении некоторого времени, когда ток в ОВ установится, замыкают ключ SA. На якорь напрямую подается полное напряжение питания  $U_{я}$ . Пусковой ток достигает максимального для ДПТ значения

$$I_{п} = \frac{U_{я}}{R_{я}} = I_{я.макс} \quad (3.31)$$

Этот способ наиболее простой, но проходит при большом токе якоря. Прямой пуск применяется для маломощных ДПТ с мощностью до нескольких сотен ватт, у которых пусковой ток не превышает 15...20 А. Такой ток ниже сварочного тока (от 40 А и выше). Поэтому, коллектор хотя и разогревается во время разгона ДПТ, но не оплавляется.

### Разгон с пусковым сопротивлением в цепи якоря

Схема пуска приведена на рис. 3.15, а. В цепь якоря последовательно с его обмоткой включены 3...5 ступеней пускового сопротивления  $R_{Пх}$  с шунтирующими их контактами  $K_x$  контакторов ( $x=1, 2, \dots$ ). На МХ ДПТ назначаются два момента:

- момент  $M_{П1}$  – максимальный момент в процессе разгона ДПТ, который принимают равным  $c_\Phi I_{Я, max}$ , где  $I_{Я, max}$  – максимально допустимый ток якоря ДПТ (каталожная величина);

- момент  $M_{П2}$  – минимальный момент в процессе разгона ДПТ, который принимают равным  $(1,1 \dots 1,3) I_{Я, ном}$ , где  $I_{Я, ном}$  – номинальный ток якоря ДПТ (каталожная величина).

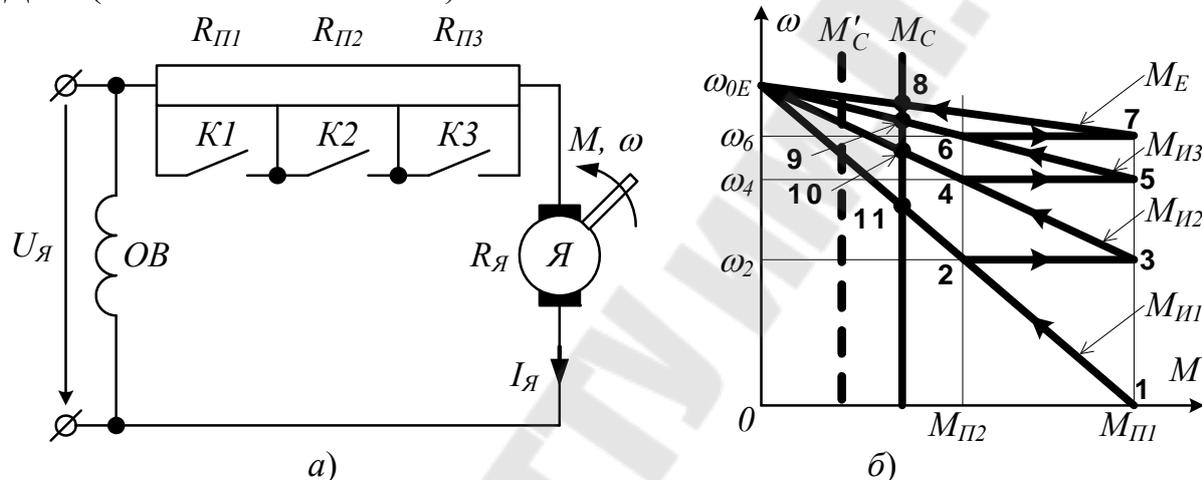


Рисунок 3.15 - Схема разгона ДПТ с использованием пусковых сопротивлений (а) и механические характеристики процесса разгона (б)

Процесс разгона заключается в последовательном выведении ступеней пусковых сопротивлений  $R_{Пх}$  путем шунтирования их контактами  $K_x$ :

1. Разгон по первой искусственной механической характеристике  $M_{П1}$  (рис. 3.15, б), когда все контакты  $K1$ ,  $K2$  и  $K3$  разомкнуты. МХ  $M_{П1}$ , описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_{Я} + R_{П1} + R_{П2} + R_{П3}}{c_\Phi^2} M.$$

Наклон МХ максимальный. Момент в точке 1 равен моменту  $M_{П1}$ . Так как Момент ДПТ превышает момент сопротивления нагрузки  $M_C$ , то двигатель разгоняется. По достижении точки 2, в которой момент ДПТ равен моменту  $M_{П2}$ , замыкается контакт  $K1$ , шунтирующий сопротивление  $R_{П1}$ . Следует скачок на вторую искусственную МХ  $M_{П2}$  при постоянной частоте вращения  $\omega_2$ .

2. Разгон по второй искусственной механической характеристике  $M_{И2}$  (рис. 3.15, б), когда контакты  $K2$  и  $K3$  разомкнуты. МХ  $M_{И2}$ , описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_{Я} + R_{П2} + R_{П3}}{c_{\Phi}^2} M .$$

Далее разгон от точки 3 до точки 4, шунтирование  $R_{П2}$ , скачок на третью искусственную характеристику при частоте вращения  $\omega_4$ .

3. Разгон по третьей искусственной механической характеристике  $M_{И3}$  (рис. 3.15, б), когда только контакт  $K3$  разомкнут. МХ  $M_{И3}$ , описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_{Я} + R_{П3}}{c_{\Phi}^2} M .$$

Далее разгон от точки 5 до точки 6, шунтирование  $R_{П3}$ , скачок на естественную характеристику при частоте вращения  $\omega_6$ .

4. Разгон по естественной механической характеристике  $M_E$  (рис. 3.15, б), когда все контакты замкнуты. МХ  $M_E$ , описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_{Я}}{c_{\Phi}^2} M .$$

Далее разгон от точки 7 до точки 8, в которой наступает равенство вращающего момента  $M_E$  ДПТ моменту сопротивления  $M_C$  нагрузки.

Как следует из построений, в процессе разгона вращающий момент ДПТ не превышал  $M_{П1}$  и, следовательно, ток якоря ДПТ был ограничен максимально допустимым  $I_{Я,мах}$ .

### ***Разгон с плавным повышением якорного напряжения***

Схемы пуска приведены на рис. 3.18.

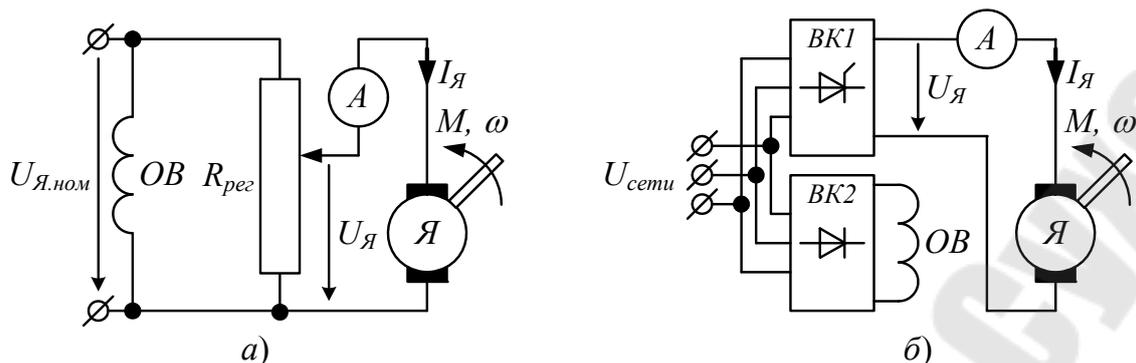


Рисунок 3.16 - Схема разгона ДПТ с использованием регулируемого напряжения якоря

Для маломощных (до 1 кВт) ДПТ применяют реостатное регулирование напряжения  $U_{я}$  на якоре. С помощью регулировочного сопротивления  $R_{рег}$  плавно повышают напряжение  $U_{я}$  с контролем тока якоря  $I_{я}$ , чтобы он не превысил  $I_{я.мах}$ . Недостатками схемы являются ограниченность тока через реостат и большие потери мощности в нем.

Для любых по мощности ДПТ применяют тиристорное регулирование напряжения  $U_{я}$  с помощью вентильного комплекта  $BK1$ . К нерегулируемому вентильному комплекту  $BK2$  подключена обмотка возбуждения ДПТ.

### Вопросы и задания

1. Какие существуют способы пуска ДПТ и каковы критерии качества процесса пуска?
2. Поясните способ прямого пуска ДПТ. В чем его недостатки?
3. Поясните способ реостатного пуска ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?
4. Поясните способ пуска ДПТ с регулируемым якорным напряжением. В чем его достоинства и недостатки?

### 3.10 Способы регулирования частоты вращения ДПТ

Существуют три основных способа регулирования частоты вращения ДПТ:

1. Реостатное, с регулируемым сопротивлением в цепи якоря;
2. Якорное, с регулируемым напряжением на якоре;
3. Полевое, с регулируемым напряжением на обмотке возбуждения.

Критериями выбора способа регулирования частоты вращения ДПТ являются:

- диапазон регулирования частоты вращения  $\omega_{мах} / \omega_{мин}$ ;
- непрерывность регулирования частоты вращения;

- наклон (жесткость) МХ;
- КПД схемы регулирования и потери мощности.

### **Реостатное регулирование**

Схема реостатного регулирования в силовой части полностью совпадает с приведенной на рис. 3.15 схемой разгона ДПТ с пусковым сопротивлением.

С помощью ступенчато изменяющегося сопротивления в цепи якоря создаются искусственные характеристик, например, как на рис. 3.15, а, три МХ  $M_{И1}$ ,  $M_{И2}$  и  $M_{И3}$ . Существует также естественная МХ  $M_E$ . Для оценки регулирующего эффекта на плоскость МХ (рис. 3.17, б) нужно нанести МХ нагрузки – график  $M_C$ . Частоты вращения в установившихся режимах определяются точками пересечения МХ нагрузки и ДПТ. Это точки 8, 9, 10 и 11.

Достоинством реостатного регулирования является отсутствие дополнительных затрат на регулировочное оборудование, так как пусковые сопротивления можно также использовать в качестве регулировочных.

Недостатки реостатного регулирования:

- малый диапазон регулирования частоты вращения – отношение максимальной частоты  $\omega_8$  к минимальной  $\omega_{11}$  не превышает трех;
- ступенчатость регулирования, так как набор достижимых частот определяется количеством точек пресечения (8, 9, 10 и 11) МХ нагрузки и конечного числа МХ ДПТ;
- мягкость искусственных МХ, приводящая к тому, что при изменении момента сопротивления нагрузки (на рис. 3.15, б пунктирная линия  $M'_C$ ) изменяются положения точек пересечения МХ и, следовательно, частота вращения ДПТ;
- низкий КПД, так как теряется большая мощность на нагрев регулировочных сопротивлений.

### **Якорное регулирование**

Схема якорного регулирования в силовой части полностью совпадает с приведенной на рис. 3.16 схемой разгона ДПТ с использованием регулируемого напряжения якоря.

Механические характеристики ДПТ описываются выражением

$$\omega = \frac{U_{я}}{c_{\phi}} - \frac{R_{я}}{c_{\phi}^2} M = \omega_0 - \frac{R_{я}}{c_{\phi}^2} M . \quad (3.32)$$

При якорном регулировании изменяется частота вращения холостого хода  $\omega_0$ , которая прямо пропорциональна напряжению  $U_{я}$ , а наклон МХ

остаётся неизменным (рис. 3.17, а). Для якорного регулирования частоты вращения ДПТ применяют либо изображённую на рис.3.16,б схему тиристорного регулирования напряжения, либо схему Г-Д (рис.3.17,б), в которой в качестве регулируемого источника напряжения выступает ГПТ.

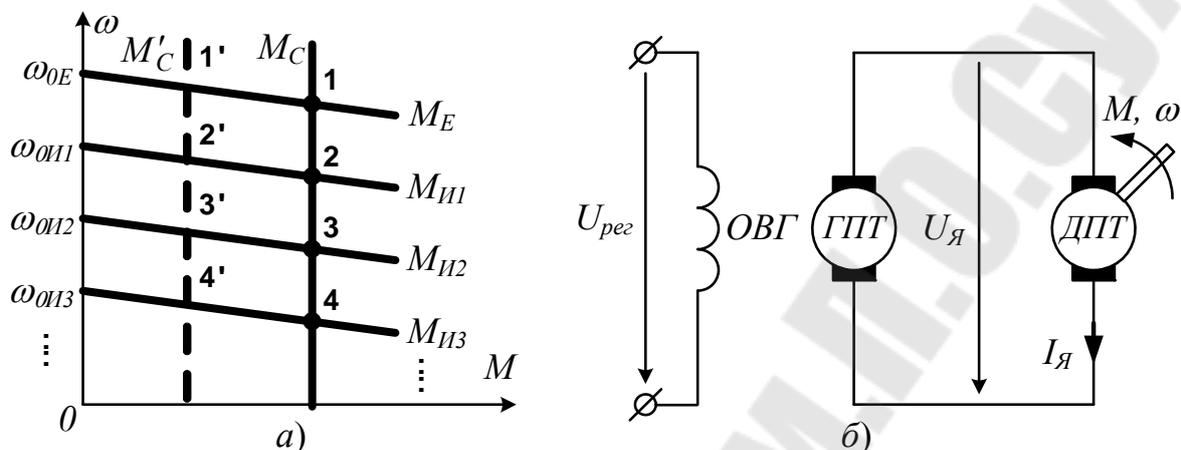


Рисунок 3.17 - Механические характеристики якорного регулирования частоты вращения ДПТ (а) и схема Г-Д (б)

Достоинства якорного регулирования:

- большой диапазон регулирования частот – до 100;
- непрерывность регулирования, так как переход между МХ осуществляется плавным изменением напряжения  $U_я$ ;
- высокая жесткость МХ при любой частоте, совпадающая с жесткостью естественной МХ, что обеспечивает практическую независимость частоты вращения ДПТ от его нагрузки, например, частоты вращения в точках 1 и 1' практически одни и те же.

Недостатком якорного регулирования является необходимость применения регулируемого источника питания (тиристорного выпрямителя или ГПТ).

### **Полевое регулирование**

Схема полевого регулирования приведена на рис. 3.18, а.

Механические характеристики ДПТ описываются выражением (3.32).

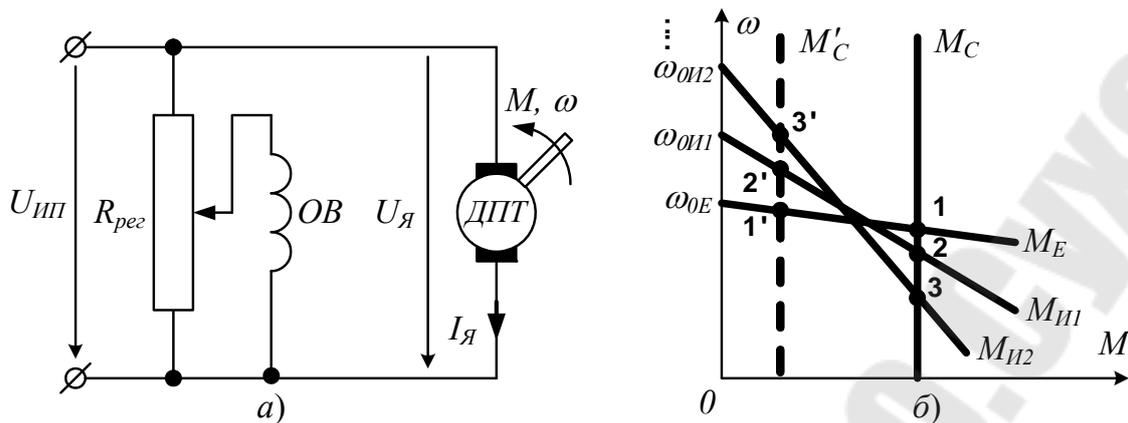


Рисунок 3.18 - Схема полевого регулирования частоты вращения (а) и механические характеристики (б)

При полевым регулировании реально возможно только понижение напряжения  $U_B$  на ОВ, что ведет к уменьшению  $c_\Phi$ . Поэтому частота вращения холостого хода  $\omega_0$ , которая обратно пропорциональна коэффициенту потока  $c_\Phi$ , возрастает, а наклон МХ увеличивается, причем более интенсивно, так как в знаменателе второй дроби коэффициент  $c_\Phi$  во второй степени. Механические характеристики ДПТ, нагрузки и получаемые частоты вращения показаны на рис. 3.20, б. Для малонагруженных ДПТ (пунктирная МХ нагрузки  $M'_C$ ) или для ДПТ большой мощности частота вращения регулируется вверх от номинальной, а для маломощных или сильно загруженных ДПТ (сплошная МХ  $M_C$ ) частота вращения понижается.

Достоинства полевого регулирования:

- возможность увеличения частоты вращения сверх номинальной;
- непрерывность регулирования, так как переход между МХ осуществляется плавным изменением напряжения  $U_B$ ;
- высокий КПД, так как в якорной цепи есть только сопротивление только самой обмотки и никаких дополнительных сопротивлений.

Недостатки реостатного регулирования:

- малый диапазон регулирования частоты вращения вверх, ограниченный примерно полуторакратным значением;
- мягкость искусственных МХ, приводящая к тому, что при изменении момента сопротивления нагрузки  $M_C$  изменяются положения точек пересечения МХ и, следовательно, частота вращения ДПТ.

### Вопросы и задания

1. Какие существуют способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса регулирования?
2. Поясните способ реостатного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

3. Поясните способ якорного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

4. Поясните способ полевого регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

### 3.11 Способы торможения ДПТ

Необходимость в электрическом торможении ДПТ обосновывается тем, что механические тормоза рассчитаны на их использование при частоте вращения не выше  $\approx 0,2\omega_{ном}$ .

Существуют три основных способа торможения ДПТ:

1. Противовключением;
2. Динамическое торможение;
3. Рекуперативное.

Критериями выбора способа торможения являются:

- интенсивность снижения частоты вращения;
- потери энергии при торможении.

#### *Торможение противовключением*

Схема торможения приведена на рис. 3.19, а. Пусть ДПТ работал в двигательном режиме с параметрами, определяемые точкой 1 (рис. 3.21, б) и на схеме были замкнуты пара контактов 1-1 контактора К. Для торможения ДПТ контакты контактора К переключаются на пару 2-2. Полярность напряжения на якоре ДПТ изменяется на противоположную и двигатель с точки 1 на МХ двигательного режима  $M_{ДВ}$  с частотой холостого хода  $\omega_{0E}$  скачком переходит в точку 2 на МХ тормозного режима МТ с частотой холостого хода –  $\omega_{0E}$ . Переход осуществляется практически мгновенно при неизменной частоте вращения:  $\omega_2 = \omega_1$ . Далее по характеристике МТ ДПТ снижает частоту вращения. В точке 3 ДПТ остановится и если его не отключить от питания, то он развернется в противоположную сторону. Чтобы не допустить этого, необходимо на подходе к точке 3 отключить питание двигателя и наложить механический тормоз.

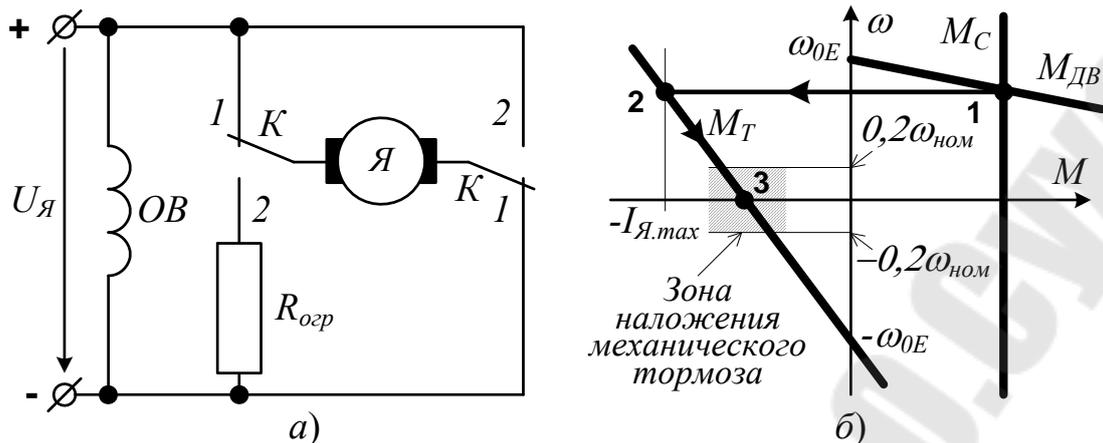


Рисунок 3.19 - Схема торможения противовключением (а) и механические характеристики процесса (б)

Для ограничения тока на уровне предельно допустимого  $I_{Я.max}$  в тормозном режиме в цепь якоря включается ограничительное сопротивление  $R_{огр}$ .

При рассмотренном способе торможения развивается максимальный тормозной момент, что способствует быстрому снижению частоты вращения. Двигатель достигает нулевой частоты вращения за конечное время. При торможении теряется энергия в ограничительном сопротивлении  $R_{огр}$ .

### Динамическое торможение

Схема торможения приведена на рис. 3.20, а. Пусть ДПТ работал в двигательном режиме с параметрами, определяемые точкой 1 (рис. 3.20, б) и на схеме были замкнуты пара контактов 1-1 контактора К. Для торможения ДПТ контакты контактора К переключаются на пару 2-2. Якорь ДПТ отключается от питания и замыкается на тормозное сопротивление  $R_{ДТ}$ . МХ ДПТ в режиме динамического торможения описывается выражением

$$\omega = -\frac{R_{Я}}{c_{\Phi}^2} M_{ДТ}. \quad (3.33)$$

График МХ МДТ проходит через начало координат.

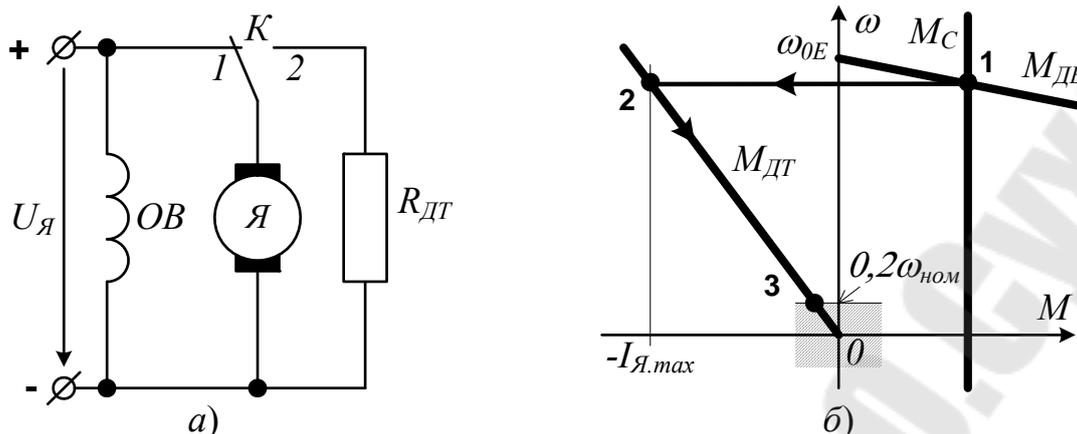


Рисунок 3.20 - Схема динамического торможения (а) и механические характеристики режима (б)

Переход с МДВ на МДТ осуществляется практически мгновенно при неизменной частоте вращения:  $\omega_2 = \omega_1$ . Далее по характеристике МДТ ДПТ снижает частоту вращения. В точке 0 ДПТ остановится и может развернуться в обратную сторону, если нагрузка ДПТ активная (например, в двигательном режиме груз поднимался, а после остановки груз может развернуть ДПТ в обратном направлении). Чтобы не допустить этого, необходимо на подходе к точке 3 отключить питание двигателя и наложить механический тормоз.

Для ограничения тока на уровне предельно допустимого  $I_{Я.max}$  в тормозном режиме в цепь якоря включается сопротивление  $R_{ДТ}$  соответствующей величины.

При динамическом торможении развивается довольно большой, но меньший чем при противовключении тормозной момент, что способствует быстрому снижению частоты вращения. Двигатель достигает нулевой частоты вращения за конечное время. При торможении теряется энергия в ограниченном сопротивлении  $R_{ДТ}$ .

### **Рекуперативное торможение**

Схема торможения приведена на рис. 3.21, а. Видно, что силовая часть такая же, как и при работе в двигательном режиме, например, при якорном регулировании (рис. 3.17).

Режим рекуперативного торможения рассмотрим на примере электропривода крана, который может как поднимать, так и опускать груз.

При подъеме груза режим рекуперативного торможения возникает в случае понижения частоты вращения ДПТ скачкообразным уменьшением якорного напряжения  $U_{Я}$ . ДПТ при неизменной частоте вращения ( $\omega_2 = \omega_1$ ) скачком переходит с МХ  $M_{E1}$  на МХ  $M_{H23}$  (рис. 2.21, б). На МХ  $M_{H23}$  часто-

та вращения  $\omega_2$  оказывается большей частоты холостого хода  $\omega_{0И}$ . Это значит, что ЭДС  $E$  двигателя становится больше приложенного к нему напряжения  $U_{Я}$ . Ток двигателя  $I_{Я}$  изменит направление на противоположное и ДПТ превратится в ГПТ. Энергия, выдаваемая ГПТ, рекуперируется (возвращается) в сеть через  $BK1$ . ДПТ тормозится до частоты  $\omega_{0И}$  с рекуперацией энергии в сеть. Далее до точки 3 двигатель тормозится подвешенным грузом.

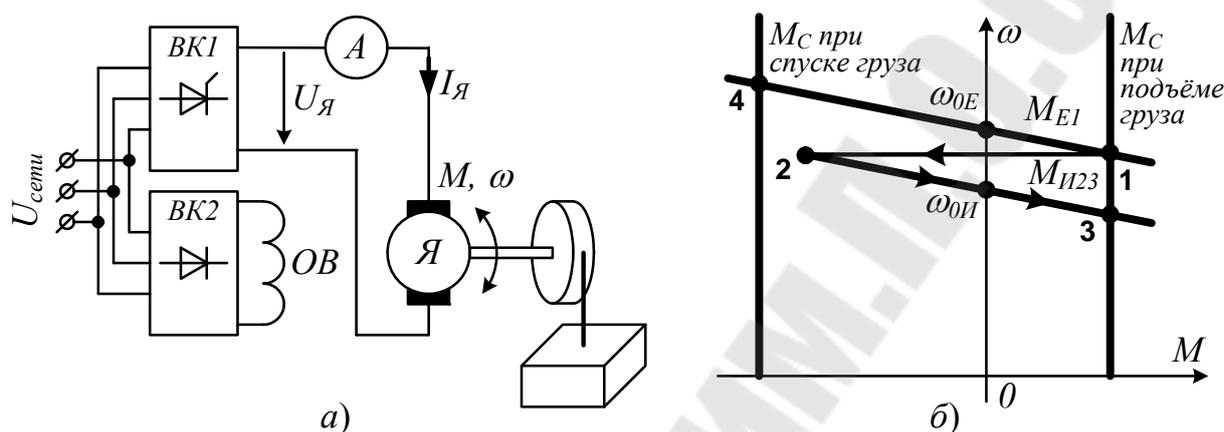


Рисунок 3.21 - Схема рекуперативного торможения (а) и механические характеристики режима (б)

При спуске груза режим рекуперативного торможения возникает в случае, когда груз, преодолев момент сопротивления в механической части привода, разгоняет ДПТ дальше сверх частоты холостого хода  $\omega_{0E}$ . Такой на графике МХ  $M_{E1}$  является точка 4. ДПТ переходит в режим генератора с возвратом энергии в сеть.

Способ рекуперативного торможения самый выгодный в энергетическом плане, так как энергия торможения возвращается в сеть.

### Вопросы и задания

1. Какие существуют способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса торможения?
2. Поясните способ торможения ДПТ противовключением и какие имеет характеристики эффективности.
3. Поясните способ динамического торможения ДПТ и какие имеет характеристики эффективности.
4. Поясните способ рекуперативного торможения ДПТ и какие имеет характеристики эффективности.

5. Поясните почему недостаточно использовать лишь механические способы торможения ДПТ.

### **3.12 Генератор независимого возбуждения и его рабочие характеристики**

#### ***Вводная часть***

Свойства генераторов постоянного тока обусловлены в основном способом питания обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают следующие типы генераторов:

1) с независимым возбуждением – обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока;

2) с параллельным возбуждением – обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно с нагрузкой;

3) с последовательным возбуждением – обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой;

4) со смешанным возбуждением – имеются две обмотки возбуждения: одна подключена параллельно нагрузке, а другая – последовательно с ней.

Генераторы рассматриваемых типов имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения, имеющие большое число витков, изготовляют из провода малого сечения; обмотку последовательного возбуждения, имеющую небольшое число витков, - из провода большого сечения. Генераторы малой мощности иногда выполняют с постоянными магнитами. Свойства таких генераторов близки к свойствам генераторов с независимым возбуждением.

Основными характеристиками, определяющими свойства генераторов постоянного тока, являются характеристики: холостого хода, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

#### ***Основная часть***

В генераторе с независимым возбуждением ток возбуждения  $I_B$  создается сторонним источником напряжения  $U_B$  и не зависит от тока якоря  $I_A$ . Ток якоря  $I_A$  равен току нагрузки  $I_H$ . Величина тока  $I_B$  определяется только положением регулировочного реостата  $R_{PB}$ , включенного в цепь обмотки возбуждения (рис. 3.22). Обычно ток возбуждения невелик и составляет 1...3% от номинального тока якоря.

Характеристикой холостого хода (рис. 3.23) называют зависимость ЭДС  $E$  от тока возбуждения  $I_B$  для ненагруженного ГПТ ( $I_A=0$ ) при посто-

янной частоте вращения  $\omega = const$ . При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение  $U$  на зажимах обмотки якоря равно ЭДС  $E = c_{\Phi} \omega$  и зависит только от величины магнитного потока  $\Phi_B$ , т.е. от тока возбуждения  $I_B$ . Поэтому характеристика холостого хода  $E = f(I_B)$  подобна магнитной характеристике  $\Phi_B = f(I_B)$ . Расхождение ветвей  $E = f(I_B)$  объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины. Обычно гистерезисом пренебрегают и используют среднюю линию между ветвями гистерезисной кривой. При  $I_B = 0$  в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма индуцируется остаточная ЭДС  $E_{ост}$ , которая составляет 2...4% от  $E_{ном}$ .

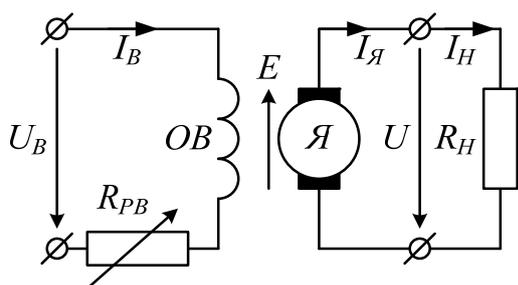


Рисунок 3.22 - Схема ГПТ с независимым возбуждением

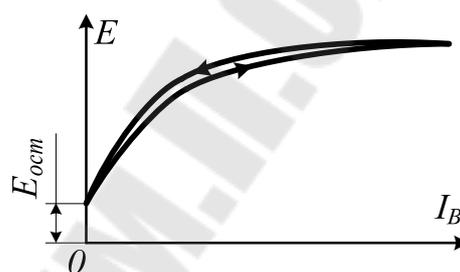


Рисунок 3.23 - Характеристика холостого хода генератора

Внешней характеристикой (рис. 3.24, а) называют зависимость  $U = f(I_A)$  напряжения  $U$  нагруженного генератора от тока нагрузки  $I_H$ , равного току якоря  $I_A$  при постоянной частоте вращения  $\omega = const$  и постоянном токе возбуждения  $I_B = const$ . В режиме нагрузки напряжение генератора равно

$$U = E(\Phi_{\Sigma}) - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = E(I_B, I_{\text{я}}) - R_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (3.34)$$

где  $E(\Phi_{\Sigma}) = E(I_B, I_{\text{я}})$  – ЭДС ГПТ, зависящая от суммарного магнитного потока, состоящего из основного потока  $\Phi_{осн}$  ОБ и потока  $\Phi_{\text{рЯ}}$  реакции якоря, причем каждый из названных потоков зависит, соответственно, от тока возбуждения  $I_B$  и якоря  $I_{\text{я}}$ .

С увеличением нагрузки напряжение  $U$  уменьшается по двум причинам:

- 1) из-за увеличения падения напряжения  $\Delta U_1 = R_{\text{я}} I_{\text{я}}$  на сопротивлении  $R_{\text{я}}$  обмотки якоря;
- 2) из-за уменьшения ЭДС  $E$  в результате размагничивающего действия реакции якоря, что показано как понижение напряжения  $U$  на  $\Delta U_2$ .

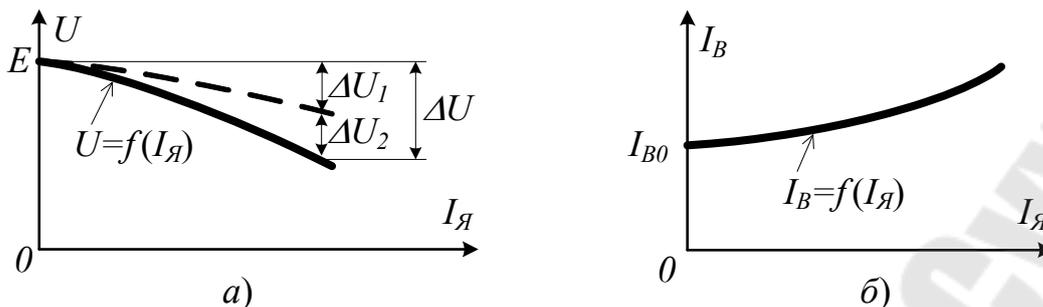


Рисунок 3.24 - Внешняя (а) и регулировочная (б) характеристики ГПТ

Изменение напряжения при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки для генераторов с независимым возбуждением составляет 5...15%.

Регулировочной характеристикой (рис. 3.24, б) называют зависимость между токами  $I_{Я}$  и  $I_{В}$ , показывающая то, каким образом следует регулировать ток возбуждения  $I_{В}$ , чтобы поддерживать постоянным напряжение  $U$  генератора при изменении тока нагрузки  $I_{Я}$ . Очевидно, что в случае падающей внешней характеристики (рис. 3.24, а) по мере роста нагрузки нужно увеличивать ЭДС  $E$ , что, в свою очередь, в соответствии с пропорциональной зависимостью между ЭДС и током возбуждения (рис. 3.23), нужно увеличивать ток возбуждения  $I_{В}$ .

### Вопросы и задания

1. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?
2. Поясните внешний вид характеристики холостого хода.
3. Поясните внешний вид внешней характеристики.
4. Поясните внешний вид регулировочной характеристики.

### 3.13 Генератор параллельного возбуждения и его рабочие характеристики

В генераторе с параллельным возбуждением ток возбуждения  $I_{В}$  создается ЭДС  $E$ , индуцируемой в якоре генератора (рис. 3.25, а). Обычно ток возбуждения  $I_{В}$  невелик и составляет 1...3% от номинального тока якоря. Поэтому, ток нагрузки  $I_{Н}$  можно считать равным току якоря  $I_{Я}$ . В цепь обмотки возбуждения может быть включен регулировочный реостат возбуждения  $R_{РВ}$ , с помощью которого устанавливают величину ЭДС  $E_0$  холостого ГПТ.

ЭДС  $E_0$  на выходе ГПТ образуется в процессе его самовозбуждения (рис. 3.25, б) при отключенной электрической нагрузке – на холостом ходу. На рисунке показаны график  $I$  холостого хода ГПТ, который будет таким же, как и ГПТ с независимым возбуждением, и график 2, связывающий между собой напряжение  $U$  и ток  $I_B$  ОВ зависимостью

$$I_B = \frac{U}{R_{OB} + R_{PB}} = \frac{E_0}{R_{OB} + R_{PB}} \quad (3.35)$$

В режиме холостого хода, при котором происходит самовозбуждение, напряжение  $U$  равно ЭДС  $E_0$  холостого хода ГПТ.

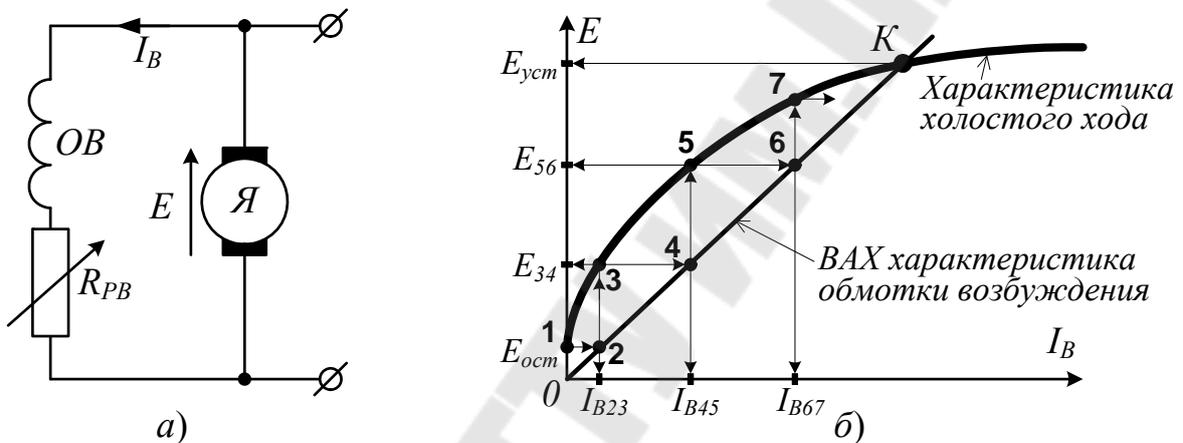


Рисунок 3.25 - Схема ГПТ с параллельным возбуждением (а) и процесс самовозбуждения (б)

Процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением состоит из следующих стадий:

1. Точка 1 – начало процесса. На клеммах ГПТ индуктируется остаточная ЭДС  $E_{ост}$ . Остаточная ЭДС, приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток  $I_{B23}$ , величиной

$$I_{B23} = \frac{E_{ост}}{R_{OB} + R_{PB}}.$$

2. Током  $I_{B23}$  в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с  $\Phi_{ост}$ , создаст ЭДС  $E_{34}$ , определяемую точкой 2.

3. ЭДС  $E_{34}$ , приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток  $I_{B45}$

$$I_{B45} = \frac{E_{34}}{R_{OB} + R_{PB}}.$$

4. Током  $I_{B45}$  в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с  $\Phi_{ост}$ , создаст ЭДС  $E_{34}$ , определяемую точкой 5.

Описанные процессы будут повторяться до тех пор, пока будет достигнута точка  $K$  пересечения графиков холостого хода ГПТ и вольтамперной характеристики ОВ (3.35). На клеммах ГПТ установится ЭДС  $E_{уст}$  (далее – просто  $E$ ).

Очевидно, что положение точки  $K$  зависит от наклона характеристик графика цепи ОВ. Чем больше сопротивление регулировочного реостата возбуждения  $R_{PB}$ , тем круче будет подъем графика цепи ОВ, тем ниже будет располагаться точка пересечения  $K$  и тем меньше будет значение ЭДС  $E$ .

Учитывая изложенное, можно сформулировать три условия самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением:

1) должна быть остаточная намагниченность  $\Phi_{ост}$  стали магнитопровода;

2) должно быть согласное с  $\Phi_{ост}$  включение ОВ по создаваемому ею магнитному потоку;

3) должно быть не слишком большим собственное сопротивление  $R_{OB}$  обмотки возбуждения, чтобы при самовозбуждении без сопротивления  $R_{PB}$  ЭДС  $E$  было бы не меньше номинального  $E_{ном}$ .

Внешняя характеристика ГПТ имеет вид, представленный на рис. 3.26. На ней помимо составляющих  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  падения напряжения  $\Delta U$  ГПТ, имеется третья составляющая  $\Delta U_3$ , обусловленная тем, что из-за снижения напряжения  $U$  понижается напряжение на обмотке возбуждения, снижается ток  $I_B$  возбуждения и снижается ЭДС  $E$ .

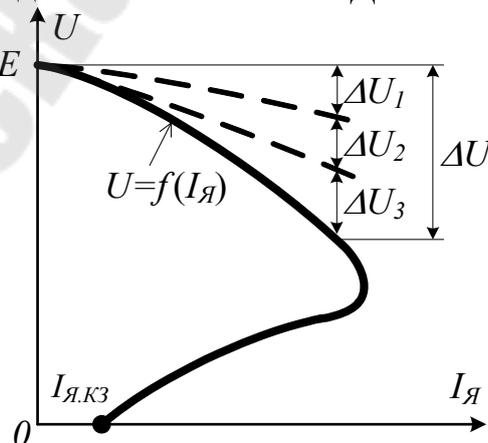


Рисунок 3.26 - Внешняя характеристика ГПТ

Если замкнуть накоротко клеммы ГПТ с параллельным возбуждением, то исчезнет напряжение на ОВ, исчезнет ток возбуждения и магнитный поток возбуждения и останутся только остаточный поток  $\Phi_{ост}$  и остаточная ЭДС  $E_{ост}$ . Ввиду малости  $E_{ост}$ , которая составляет 2...4% от  $E_{ном}$ , ток короткого замыкания  $I_{Я.КЗ}$  будет не выше номинального тока ГПТ. Значит для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.

### Вопросы и задания

1. Поясните процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением.
2. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с параллельным возбуждением.
3. Почему для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания?

### 3.14 Генератор смешанного возбуждения и его рабочие характеристики

В генераторе со смешанным (компаундным) возбуждением поток создается двумя обмотками – шунтовой (ОВШ) и серийной (ОВС) (рис. 3.27, а). Применяется только параллельно-последовательное возбуждение с  $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} \pm \Phi_{С}$  с преобладанием магнитного потока  $\Phi_{Ш}$  шунтовой ОВ над магнитным потоком  $\Phi_{С}$  серийной ОВ.

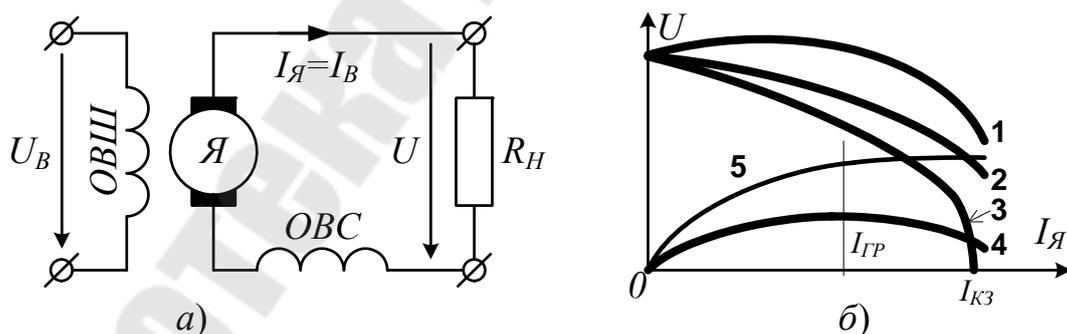


Рисунок 3.27 - Схема ГПТ со смешанным возбуждением (а) и внешние характеристики (б)

На рис. 3.27, б приведена внешняя характеристика 2, созданная только шунтовой обмоткой возбуждения. Эта характеристика взята с рис. 3.24, а.

Для обоснования формы внешней характеристики 4, созданной только серийной обмоткой возбуждения, используем характеристику холостого хода 5, которая имеет такой же вид, как у ГПТ с независимым возбуж-

дением (рис. 3.23). Ток нагрузки является током якоря  $I_A$  и одновременно током возбуждения  $I_B$ . При увеличении тока якоря  $I_A$  увеличивается ЭДС  $E$ , так как с ростом тока увеличивается магнитный поток ОВС, но и одновременно растет падение напряжения  $\Delta U$  на сопротивлении провода ОВС. На участке изменения тока якоря  $I_A$  от нулевого значения до некоторого граничного значения  $I_{ГР}$ , рост ЭДС  $E$  превышает рост падения напряжения  $\Delta U$  и, поэтому, график 4 возрастающий. После тока  $I_{ГР}$  на характеристике 5 холостого хода начинается участок насыщения, в результате чего ЭДС  $E$  практически перестаёт расти, а рост  $\Delta U$  продолжается. Поэтому на графике 4 после тока  $I_{ГР}$  имеется ниспадающий участок.

При согласном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки складываются ( $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} + \Phi_C$ ) и, соответственно, внешние характеристики 2 и 4 складываются, образуя характеристику 1. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что выходное напряжение  $U$  практически неизменно во всем диапазоне изменения тока нагрузки. Такие ГПТ применяются в автономных источниках электроэнергии, состоящими из одного единственного генератора.

При встречном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки вычитаются ( $\Phi_{ОВ} = \Phi_{Ш} - \Phi_C$ ) и, соответственно, также вычитаются внешние характеристики 2 и 4, образуя характеристику 3. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что при коротком замыкании ГПТ ( $U=0$ ) ток ограничен некоторым допустимым значением  $I_{КЗ}$ . Такие ГПТ применяются в качестве сварочных, для которых режим короткого замыкания является нормальным, рабочим.

### Вопросы и задания

1. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.
2. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и серийной обмоток возбуждения?

### 3.15 Условия параллельной работы ГПТ.

#### Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности

В сетях электроснабжения постоянного тока устанавливается не менее двух ГПТ, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного ГПТ):

- 1) Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного ГПТ;
- 2) Обеспечивается экономичная работа параллельно работающих ГПТ, в которой загрузка ГПТ может поддерживаться на уровне, обеспечи-

вающем максимальный к.п.д. Так, если нагрузка двух параллельно работающих ГПТ составляет 0,35...0,4, то при выводе из работы одного ГПТ, оставшийся в работе ГПТ загрузится до 0,7...0,8, при которой к.п.д. генератора максимально;

3) исключается перегрузка ГПТ. Так, если работающие ГПТ нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один ГПТ, который возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие ГПТ.

Различают параллельную работу ГПТ:

- на сеть бесконечной мощности;
- соизмеримой между собой мощности.

Для параллельной работы используют преимущественно ГПТ с независимым возбуждением.

Для параллельной работы ГПТ, должны быть выполнены ряд условий.

### ***Параллельная работа ГПТ на сеть бесконечной мощности***

Схема параллельной работы ГПТ с сетью бесконечной мощности приведена на рис. 3.28, а.

При введении ГПТ для работы параллельно с сетью с напряжением  $U_C$  должны быть выполнены следующие условия:

1. ГПТ должен быть разгруженным.
2. Полярность напряжения подключаемого генератора должна совпадать с полярностью напряжения на шинах сети.
3. ЭДС  $E$  ГПТ должна быть равна напряжению  $U_C$  сети.

При соблюдении указанных условий ГПТ включается с помощью  $SA$  безударно, означаящее следующее: ток якоря  $I_A$  ГПТ в момент включения нулевой. Внешняя характеристика 3 подключенного ГПТ совпадает при токе  $I_A=0$  с характеристикой 1 сетевого напряжения постоянного уровня (рис. 3.28, б).

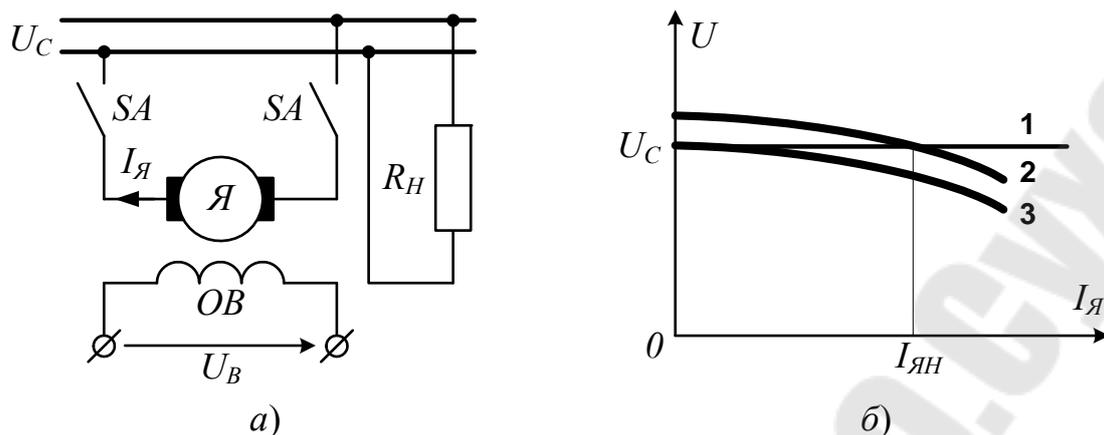


Рисунок 3.28 - Схема параллельной работы ГПТ на сеть бесконечной мощности (а) и внешние характеристики (б)

Далее нужно нагрузить введенный в работу ГПТ, соблюдая следующие условия нагружения:

1. Ток якоря  $I_Я$  ГПТ не должен превышать максимально допустимого.
2. Нагрузочный ток  $I_{ЯН}$  ГПТ должен быть таким, чтобы ток каждого генератора из группы всех параллельно работающих, был бы прямо пропорционален номинальной мощности генератора.

Для нагружения ГПТ нужно увеличить его напряжение возбуждения. Внешняя характеристика 3 такого ГПТ сместится параллельно вверх в положение 2 (рис. 3.28, б). Точкой пересечения графиков 1 и 2 определится ток нагрузки  $I_{ЯН}$  ГПТ.

### **Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности**

Схема параллельной работы ГПТ соизмеримой мощности приведена на рис. 3.29, а. Пусть сначала на нагрузку работал только ГПТ1. Назовем его ведущим генератором и он изначально обеспечивал в сети уровень заданный напряжения  $U_{зад}$ , равный, например номинальному напряжению на нагрузке. Ток ведущего ГПТ1 составлял  $I_{Я1Н}$  (рис. 3.29, б), который определяется точкой пересечения графиков  $U_{зад}$  и  $I$ . Далее на сеть подключается ГПТ2, который назовем ведомым. Условия включения ГПТ2 такие же, как и при включении его на сеть бесконечной мощности. Два условия нагружения ГПТ2, применяемые в сети бесконечной мощности, должны быть дополнены третьим – напряжение сети должно остаться неизменным, равным  $U_{зад}$ .

Пусть ГПТ2 введен в работу с внешней характеристикой 2. Ток нагрузки  $I_{Я2Н}$  ведомого генератора будет нулевым.

Для нагружения ГПТ2 нужно увеличить его ток возбуждения. Внешняя характеристика сместится параллельно в положение 2'. ГПТ2 возьмет на себя ток  $I'_{Я2Н}$ , ток  $I'_{Я1Н}$  ведущего ГПТ2 уменьшится, так как сумма токов

обоих генераторов должна остаться постоянной и равной току  $I_H$ , потребляемому нагрузкой:

$$I_H = I'_{Я1H} + I'_{Я2H} = const \Rightarrow I'_{Я2H} = I_H - I'_{Я1H}. \quad (3.36)$$

До нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 имело вид

$$U_{зад} = E_1 - R_{Я1} I_{Я1H}. \quad (3.37)$$

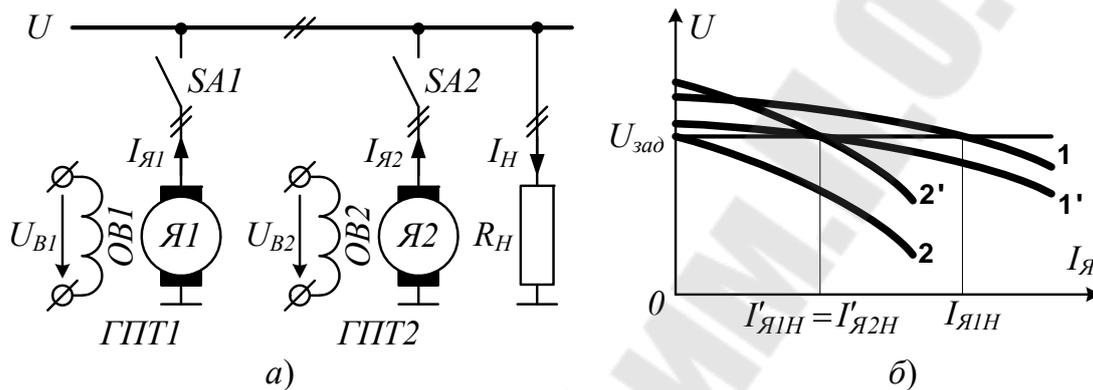


Рисунок 3.29 - Схема параллельной работы соизмеримых по мощности ГПТ (а) и внешние характеристики (б)

После нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 примет вид

$$U'_{зад} = E_1 - R_{Я1} I'_{Я1H}. \quad (3.38)$$

Так как ток ГПТ понизился с  $I_{Я1H}$  до  $I'_{Я1H}$ , то из сопоставления формул (3.37) и (3.38) при  $E_1 = const$  следует, что напряжение сети  $U$  повысится с  $U_{зад}$  до  $U'_{зад}$ .

Для понижения напряжения сети нужно уменьшить ток возбуждения ведущего ГПТ1. Это снизит его ЭДС  $E_1$  до такого значения  $E'_1$ , что напряжение сети останется равным  $U_{зад}$ :

$$U_{зад} = E'_1 - R_{Я1} I'_{Я1H}.$$

Это приведет к параллельному смещению внешней характеристики ГПТ1 в положение  $I'$ .

Одновременными регулировками напряжений возбуждения обоих генераторов добиваются того, чтобы токи обоих генераторов, например, одинаковой мощности, были бы одинаковыми

$$I'_{Я1H} = I'_{Я2H}.$$

## Вопросы и задания

1. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
2. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.
3. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?

### 3.16 Короткое замыкание ГПТ

Основной магнитный поток  $\Phi_{осн}$  в МПТ складывается из магнитного потока остаточного намагничивания  $\Phi_{ост}$  и потока  $\Phi_{возб}$ , созданного токами в обмотках возбуждения. Соответственно названным потокам в ГПТ индуктируются остаточная ЭДС  $E_{ост}$  и ЭДС  $E_{возб}$  от потока возбуждения. В переходных процессах ЭДС  $E_{ост}$  остается постоянной величиной, а ЭДС  $E_{возб}$ :

- изменяется во времени, поэтому для нее нужно применять обозначение мгновенной величины  $e_{возб}$ , подчеркивающее этим ее изменчивость;
- ЭДС  $e_{возб}$  зависит от тока возбуждения  $i_B$  и от частоты вращения  $\omega$  якоря.

Для ГПТ независимого и параллельного возбуждения, имеющих только по одной шунтовой обмотке возбуждения, процесс короткого замыкания описывается системой уравнений

$$\begin{cases} E_{ост} + e_{возб} = L_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + R_{Я} i_{Я}, \\ u_B = L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B, \\ e_{возб} = k_{\Phi} i_B \omega, \end{cases} \quad (3.39)$$

где  $u_B$  – напряжение на ОВ, равное нулю для ГПТ с параллельным возбуждением и постоянному напряжению возбуждения  $U_B$  для ГПТ с независимым возбуждением.

Рассмотрим короткое замыкание в ГПТ с независимым возбуждением.

Для этого ГПТ напряжение возбуждения  $u_B$  остаются постоянным, поэтому, как следует из второго уравнения системы (3.39), ток возбуждения  $i_B$  также будет неизменными и постоянной будет ЭДС  $e_{возб} = k_{\Phi} i_B \omega = const$  или  $e_{возб} = E_B$ , если учесть еще постоянство частоты вращения  $\omega$  якоря ГПТ. Процесс КЗ описывается первым уравнением системы

$$E_{ост} + E_B = L_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + R_{Я} i_{Я}.$$

Решением этого уравнения будет экспоненциальный закон изменения тока КЗ:

$$i_{Я} = I_{Я.уст} + (I_{Я.нач} - I_{Я.уст}) e^{-\frac{R_{Я} t}{L_{Я}}} = I_{Я.уст} + (I_{Я.нач} - I_{Я.уст}) e^{-\frac{t}{T_{Я}}}, \quad (3.40)$$

где  $I_{Я.нач}$  – начальный ток якоря до КЗ;  $I_{Я.уст}$  – установившийся ток КЗ, равный;  $T_{Я}$  – постоянная времени якоря, равная  $T_{Я} = L_{Я}/R_{Я}$ .

График тока КЗ приведен на рис. 3.30, а. Значение  $I_{Я.уст}$  составляет 10...40 крат номинального тока  $I_{Я.ном}$  якоря. Это опасный для щеточно-коллекторного узла ток и ГПТ должен быть отключен от нагрузки быстродействующим автоматическим выключателем.

Рассмотрим короткое замыкание в ГПТ с параллельным возбуждением.

Для этого ГПТ напряжение возбуждения  $u_B$  обращается в ноль и, соответственно, понижение тока возбуждения  $i_B$  до нуля будет описываться вторым уравнением системы. ЭДС  $e_{возб} = k_{\phi} i_B \omega = var$  будет изменяться из-за входящего в него тока  $i_B$  даже при постоянстве частоты вращения  $\omega$  якоря.

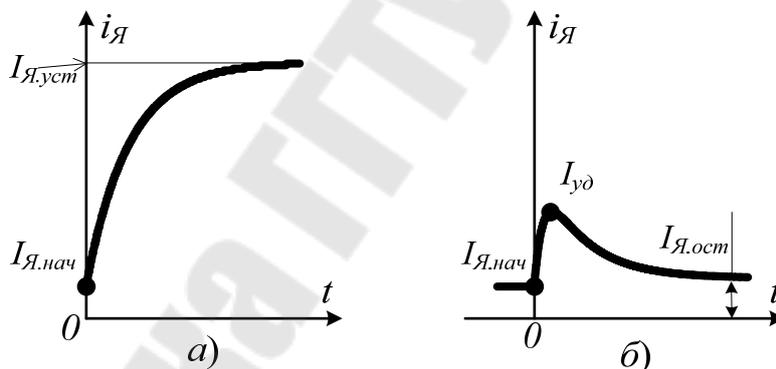


Рисунок 3.30 - Графики тока короткого замыкания в ГПТ независимого (а) и параллельного (б) возбуждения

Процесс КЗ описывается системой уравнений

$$\begin{cases} E_{ост} + k_{\phi} i_B \omega = L_{Я} \frac{di_{Я}}{dt} + R_{Я} i_{Я}, \\ 0 = L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B, \end{cases}$$

или в операторном виде

$$\begin{cases} E_{ост} + k_{\Phi} i_B \omega = (L_{Я} p + R_{Я}) i_{Я}, \\ 0 = (L_B p + R_B) i_B \end{cases} \quad \Downarrow \quad (3.41)$$

$$\begin{cases} E_{ост} + k_{\Phi} i_B \omega = R_{Я} (T_{Я} p + 1) i_{Я}, \\ 0 = R_B (T_B p + 1) i_B, \end{cases}$$

где  $T_B$  – постоянная времени обмотки возбуждения, равная  $T_B = L_B / R_B$ .

Исключаем из второй системы уравнений (3.41) ток  $i_B$  и выводим операторное уравнение для тока якоря  $i_{Я}$  в режиме КЗ:

$$\begin{cases} i_B = \frac{R_{Я} (T_{Я} p + 1) i_{Я} - E_{ост}}{k_{\Phi} \omega}, \\ 0 = R_B (T_B p + 1) i_B \end{cases} \quad \Downarrow$$

$$R_B (T_B p + 1) \frac{R_{Я} (T_{Я} p + 1) i_{Я} - E_{ост}}{k_{\Phi} \omega} = 0 \quad \Downarrow \quad (3.42)$$

$$(T_B p + 1) [R_{Я} (T_{Я} p + 1) i_{Я} - E_{ост}] = 0 \quad \Downarrow$$

$$(T_B p + 1) (T_{Я} p + 1) i_{Я} = \frac{E_{ост}}{R_{Я}} = I_{Я.ост}.$$

Решением последнего уравнения системы будет ток КЗ, изменяющийся по закону

$$i_{Я} = I_{Я.ост} + C_1 e^{-\frac{t}{T_{Я}}} + C_2 e^{-\frac{t}{T_B}},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных значений токов якоря и обмотки возбуждения.

График тока КЗ приведен на рис. 3.30, б. Значение  $I_{Я.ост}$  не превышает номинального тока  $I_{Яном}$  якоря. Этот ток не опасен для щеточно-коллекторного узла. Однако в начале процесса к.з. возникает импульс тока,

называемый ударным током  $I_{yд}$ , который может быть опасен для щеточно-коллекторного узла ГПТ.

### Вопросы и задания

1. Какими уравнениями описывается процесс короткого замыкания в ГПТ с независимым и параллельным возбуждением?
2. Как рассчитать ток короткого замыкания для ГПТ с независимым возбуждением?
3. Как рассчитать ток короткого замыкания для ГПТ с параллельным возбуждением?

### 3.17 Энергетическая диаграмма и коэффициент полезного действия МПТ

В электрических машинах при преобразовании энергии одного вида в другой часть энергии теряется в отдельных ее узлах, превращаясь в тепло.

В машинах постоянного тока различают следующие виды потерь:

1. Механические потери  $p_M$ : а) на трение в подшипниках; б) на трение щеток о коллектор; в) на трение якоря о воздух; г) вентиляционные. Обычно эти потери определяются по эмпирическим формулам.

2. Потери в стали якоря (магнитные)  $p_c$ : а) потери на гистерезис, обусловленные перемагничиванием сердечника якоря и зубцов при вращении; б) потери на вихревые токи, обусловленные пересечением магнитным потоком отдельных точек массива якоря. Вихревые токи замыкаются в плоскостях продольного разреза якоря. Для уменьшения потерь на вихревые токи якорь собирают из штампованных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Потери в стали, учитывающие потери на гистерезис и вихревые токи, определяются по формуле

$$p_c = k_0 p_{yд} \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} B^{1,6} G,$$

где  $k_0$  – опытный коэффициент, учитывающий влияние обработки и сборки листовой стали якоря;

$p_{yд}$  – удельные потери в стали, зависящие от сорта и толщины листов электротехнической стали;

$f$  – частота перемагничивания сердечника якоря;

$B$  – магнитная индукция в стали сердечника;

$G$  – масса сердечника якоря.

Эта формула является универсальной. По ней определяются потери в стали и для машин переменного тока.

3. Электрические потери  $p_{\text{э}}$ : а) в обмотке якоря; б) в обмотке возбуждения; в) в обмотке добавочных полюсов; г) в компенсационной обмотке; д) в контактном слое щеток. Потери а), б), в), г) определяются по формуле  $p=I^2R$ , где  $I$  и  $R$  — соответственно ток, проходящий по обмотке, и ее сопротивление.

Потери в контакте щеток  $p_{\text{щ}}=\Delta U_{\text{щ}}I$ , где  $\Delta U_{\text{щ}}=0,2\dots3,5\text{В}$  — переходное падение напряжения на пару щеток, определяемое по сортаменту щеток. Согласно ГОСТ среднее значение  $\Delta U_{\text{щ}}=2\text{В}$ .

4. Добавочные потери  $p_{\text{д}}$ : а) механические потери, обусловленные вибрацией вала, щеток и пр.; б) потери в стали, включающие потери в стали якоря в результате неравномерного распределения индукции в зубцах при нагрузке; потери в полюсных наконечниках, обусловленные пульсацией основного потока вследствие зубчатости якоря и др.; в) электрические потери, включающие потери в меди якоря вследствие вытеснения тока в пазу; потери в контакте щеток из-за неравномерного распределения плотности тока; потери в уравнивательных соединениях якорной обмотки и др.

Так как добавочные потери трудно поддаются учету, ГОСТ для нормальных машин постоянного тока предусматривает  $p_{\text{д}}=0,01\cdot P_{\text{ном}}$ , а для компенсированных машин постоянного тока  $p_{\text{д}}=0,005\cdot P_{\text{ном}}$ , где  $P_{\text{ном}}=U_{\text{ном}}I_{\text{ном}}$  — номинальная электрическая мощность машины.

Полные потери машины постоянного тока

$$\Sigma p = p_{\text{м}} + p_{\text{с}} + p_{\text{э}} + p_{\text{д}}. \quad (3.43)$$

При подведении к машине мощности  $P_1$  полезная мощность

$$P_2 = P_1 - \Sigma p. \quad (3.44)$$

Энергетическая диаграмма, построенная по выражениям (3.43) и (3.44), приведена на рис. 3.31, а.

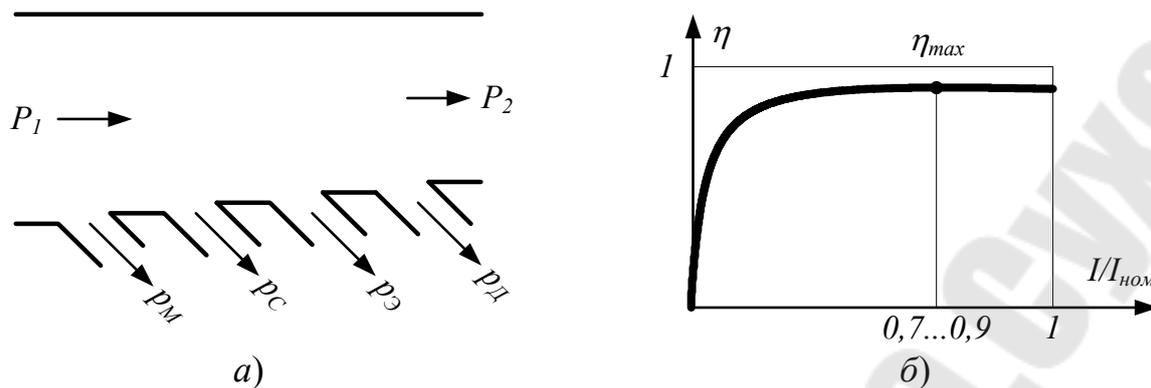


Рисунок 3.31 - Энергетическая диаграмма машины постоянного тока (а) и зависимость к.п.д. от загрузки по току (б)

Коэффициентом полезного действия машины называется отношение полезной мощности к подведенной:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}.$$

МПТ имеют следующие значения к.п.д. (таблица 3.1)

Таблица 3.1

Машины	КПД
Малые (1...10 кВт)	0,75...0,85
Средние (10...100 кВт)	0,85...0,92
Большие (>100 кВт)	0,92...0,97

КПД машины зависит от нагрузки. Характеристика КПД  $\eta = f(I)$  при  $U = const (U_{ном})$  и  $\omega = const (\omega_{ном})$  представлена на рис. 3.31, б.

Для определения условий максимума КПД выразим его в виде уравнения  $\eta = f(I)$  и первую производную приравняем нулю.

Для генератора постоянного тока полезная мощность  $P_2 = UI$ .

Полные потери состоят из:

- потерь  $p_0$ , не зависящих от тока якоря, (механических, потерь в стали и цепи параллельного возбуждения);
- потерь, зависящих от тока якоря в первой степени,  $a_1 I$  (потерь в контакте щеток);
- потерь, зависящих от квадрата тока якоря,  $a_2 I^2$  (потерь в обмотке якоря и во всех последовательных обмотках, добавочных потерь).

Итак, полные потери машины

$$\Sigma p = p_0 + a_1 I + a_2 I^2,$$

а КПД генератора

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + a_1 I + a_2 I^2}{UI + p_0 + a_1 I + a_2 I^2}.$$

Из уравнения  $d\eta/dI=0$  после решения получаем  $p_0=a_2 I^2$ .

Максимальный к.п.д. будет при таком токе якоря, когда потери, зависящие от квадрата тока, равны потерям, не зависящим от тока. Обычно при расчете машины соотношение потерь устанавливают таким, чтобы максимальный КПД достигался при загрузке в пределах  $I=(0,7...0,9)I_{ном}$  (рис. 3.31, б).

### Вопросы и задания

1. Какие виды потерь существуют в машинах постоянного тока?
2. Составьте энергетическую диаграмму и формулу КПД.
3. При какой загрузке по току КПД машины постоянного тока максимальный?

## 4 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 4.1 Устройство, принцип действия синхронного генератора (СГ)

#### Устройство СГ

Синхронный генератор является электрической машиной переменного тока, предназначенный для выработки системы трехфазных напряжений. СГ состоит из статора и ротора (рис. 4.1, а). На статоре размещены три обмотки, которые выполнены по всем правилам, по которым выполняются обмотки статора АД: угол сдвига в пространстве между фазными обмотками составляет  $120^\circ/p_{\Pi}$ , график магнитного поля каждой обмотки имеет синусоидальную форму.

Далее, с целью упрощения изложения материала, примем число пар полюсов обмотки статора равным единице ( $p_{\Pi} = 1$ ) и тогда между обмотками пространственный угол составит  $120^\circ$ . Назначение статора – с его обмоток снимается выработанные СГ трехфазные напряжения.

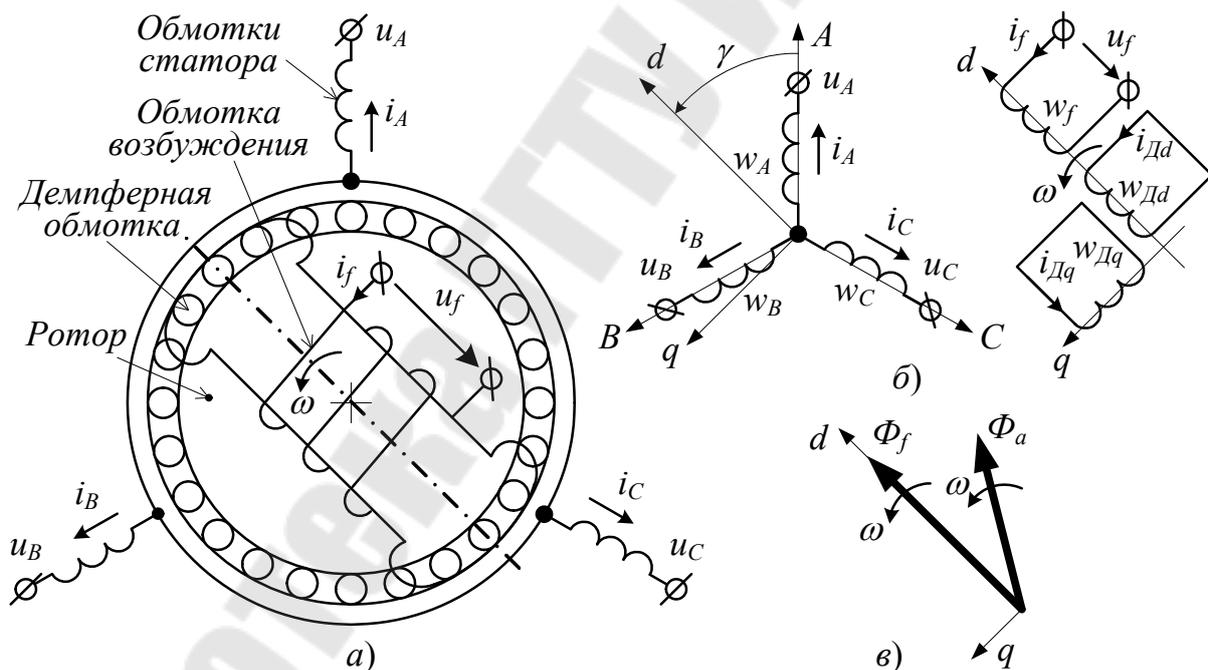


Рисунок 4.1 - Синхронный генератор (СГ): устройство (а), схема обмоток (б) и потоков обмотки возбуждения  $\Phi_f$  и реакции якоря  $\Phi_a$  (в)

На роторе, который приводится во вращение сторонним двигателем, например, дизелем, содержатся две обмотки – возбуждения (индекс «f» в обозначениях сигналов) и демпферная (индекс «Д» в обозначениях сигналов). Обмотка возбуждения располагается на полюсных наконечниках ротора, концы ее выведены на кольца, установленные на валу ротора,

а к кольцам прилегают щетки. К щеткам подведено постоянное напряжение  $u_f$  возбуждения. Назначением обмотки возбуждения состоит в создании постоянного магнитного поля – потока  $\Phi_f$  (рис. 4.1, б, в). Демпферная обмотка является короткозамкнутой обмоткой из стержней, уложенных в пазы на периферии ротора. По конструкции она ничем не отличается от короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя. Назначением демпферной обмотки является обеспечение устойчивости работы СГ при скачкообразных изменениях электрической нагрузки СГ.

### **Принцип действия СГ**

Магнитное поле обмотки возбуждения (поток  $\Phi_f$ ) вращающегося ротора последовательно пересекает контура фазных обмоток статора и в них индуцируется система трехфазных ЭДС

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t), \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi / 3), \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi / 3), \end{cases} \quad (4.1)$$

причем частота ЭДС совпадает с частотой вращения ротора СГ (при  $p_{II}=1$ ).

Концы статорной обмотки выведены на клеммник. Эти ЭДС снимаются с выводов статорной обмотки. При подключении нагрузки к выводам по обмоткам статора потекут фазные токи  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$ . Эти токи создадут во внутренних сопротивлениях обмоток статора (сопротивления состоит из активного сопротивления  $R$  проводников обмоток и индуктивного сопротивления рассеяния  $X_p$ ) падения напряжения. За вычетом этих падений напряжений из ЭДС (4.1) на выводах образуется три фазных напряжения  $u_A$ ,  $u_B$  и  $u_C$ . Этим завершаются пояснения того, как СГ используется по назначению.

При работе СГ под нагрузкой возникает побочный эффект – реакция якоря, суть которой состоит в следующем. Системой трехфазных токов  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  в статоре создается вращающееся магнитное поле  $\Phi_a$  (рис. 1.4, в). Это поле вращается синхронно с основным магнитным полем  $\Phi_f$  и индуцирует в обмотках статора свои собственные ЭДС. Нагрузка, подключаемая к СГ, преимущественно активно-индуктивная – это АД, трансформаторы. При такой нагрузке все фазные ЭДС  $e_A$ ,  $e_B$  и  $e_C$  существенно уменьшаются. Описанное явление влияния магнитного поля статора  $\Phi_a$  на магнитное поле обмотки возбуждения  $\Phi_f$  и, в конечном счете – к уменьшению ЭДС, называется реакцией якоря.

Якорем у СГ называется статор. Названием «якорь» подчеркивается аналогия обмоток статора СГ с обмоткой якоря генератора постоянного

тока в том смысле, что именно в обмотке якоря индуцируется ЭДС. Названием «статор» подчеркивается принадлежность обмоток неподвижной части СГ.

### **Назначение демпферной обмотки**

В установившемся режиме работы СГ, когда отдаваемая им активная мощность равна активной мощности, потребляемой нагрузкой, действующие значения напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  и их частота стабильны. Стабильность частоты означает, что вращающий момент дизеля в точности равен моменту сопротивления СГ. Если, например, к СГ подключить нагрузку, которая будет потреблять активную мощность, то баланс моментов дизеля и СГ нарушится и частота вращения  $\omega$  СГ начнет снижаться и будет понижаться частота выходного напряжения СГ. Для неавтономно работающего СГ это является аварийной ситуацией и важно не допустить снижения частоты вращения ротора до тех пор, пока вращающий момент дизеля поднимется. Как только ротор начнет снижать частоту вращения, его демпферная обмотка начнет пересекаться магнитным полем статора  $\Phi_a$  и на ротор начнет действовать электромагнитная сила и момент по тому же принципу направлен в ту же сторону, в какую направлен вращающий момент дизеля, и он предотвратит снижение частоты вращения СГ после подключения к нему электрической нагрузки. При отключении электрической нагрузки СГ его ротор начнет ускоряться и демпферная обмотка создаст тормозной момент. Описанная способность демпферной обмотки гасить быстрые изменения частоты вращения ротора и дало ей название – демпферная.

Схемы соединения обмоток СГ и их оси показаны на рис. 4.1, б. Оси  $A$ ,  $B$  и  $C$  привязаны к соответствующим обмоткам статора и неподвижны в пространстве. С ротором связывают систему ортогональных осей  $d$ - $q$ , причем ось  $d$  – продольная и направлена по оси обмотки возбуждения, а ось  $q$  – поперечная. При вращении ротора меняется угол  $\gamma$  между осями  $A$  и  $d$  по зависимости  $\gamma = \omega t$ .

### **Вопросы и задания**

1. Поясните устройство СГ.
2. Поясните принцип действия СГ.
3. Что такое реакция якоря для СГ?
4. Поясните назначение демпферной обмотки.

## 4.2 Реакция якоря СГ при различных характерах нагрузки. Метод двух реакций

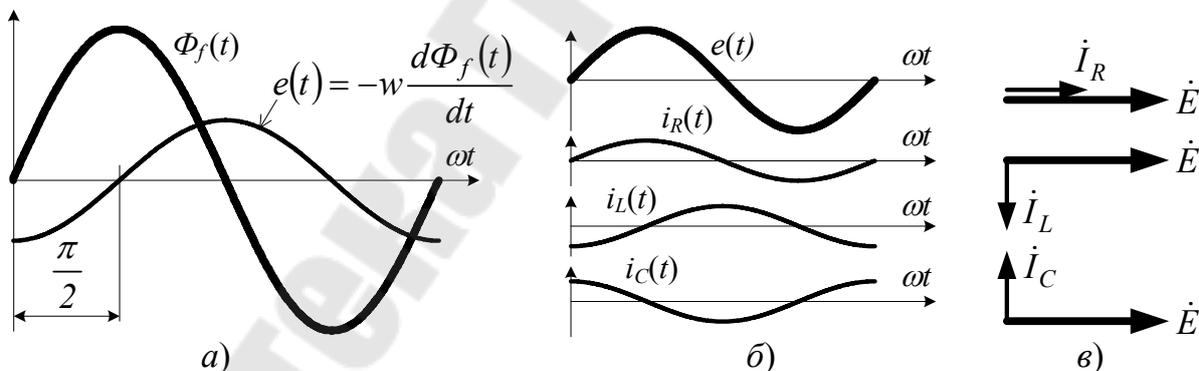
Профиль полюсного наконечника обмотки возбуждения (ОВ) выбирают таким, чтобы создаваемое ОВ магнитное поле было бы идеальной синусоидальной формы: по центру наконечника зазор минимальный, а по краям – максимальный. При вращении ротора поле  $\Phi_f(t)$  ОВ для обмоток статора представляет собой бегущую волну синусоидальной формы (рис. 4.2, а):

$$\Phi_f(t) = \Phi_{mf} \sin \omega t. \quad (4.2)$$

Это поле индуцирует в обмотках статора ЭДС

$$\begin{aligned} e(t) &= -w \frac{d\Phi_f}{dt} = -w \frac{d\Phi_{mf} \sin \omega t}{dt} = \\ &= -w \omega \underbrace{\Phi_{mf}}_{E_m} \cos \omega t = E_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Из сопоставления формул (4.2) и (4.3) видно, что ЭДС  $e$  отстает по фазе от возбуждающего ее поля  $\Phi_f$  на  $90^\circ$  (рис. 4.2, а).



Риснок 4.2 - Фазовое соотношение между магнитным потоком и наводимой им э.д.с. (а); фазовые соотношения между токами в резисторе, катушке, конденсаторе и приложенной к ним э.д.с. (б); векторные диаграммы (в)

Если подключить к СГ нагрузку, то в зависимости от ее характера (активной  $R$ , индуктивной  $L$  и емкостной  $C$ ), между  $e$  и  $i$  установятся фазовые сдвиги (рис. 4.2, б). Векторные диаграммы для разных нагрузок приведены на рис. 4.2, в.

Построим векторные диаграммы нагруженного СГ при различных характерах нагрузки.

### Нагрузка СГ активная (рис. 4.3, а)

Магнитный поток ОВ  $\Phi_f$  наводит в статоре основную ЭДС  $E$ , отстающую от потока на  $90^\circ$ . ЭДС  $E$  создает в активном сопротивлении  $R$  совпадающий с ней по фазе ток  $I_R$ . Ток  $I_R$  создаст в обмотке статора, которую принято называть (см. тему 4.1) также якорем, магнитный поток  $\Phi_{aq}$  реакции якоря. Индекс « $q$ » в обозначении  $\Phi_{aq}$  подчеркивает тот факт, что, как следует из построений, поток  $\Phi_{aq}$  перпендикулярен потоку  $\Phi_f$  и так как ось  $d$  проводят по оси потока  $\Phi_f$  (рис. 4.1, в), то перпендикулярный к нему поток  $\Phi_{aq}$  естественно будет поперечным. Также поперечным током  $I_{aq}$  нужно считать ток  $I_R$ . Ось  $q$  является поперечной осью СГ (рис. 4.1, б). Полный поток  $\Phi_\Sigma$  равный векторной сумме потоков  $\Phi_f$  и  $\Phi_{aq}$  будет несколько больше основного магнитного потока  $\Phi_f$ . Явление увеличения суммарного потока СГ называется его подмагничиванием. Следовательно, реакция якоря при активной нагрузке СГ является слабо подмагничивающей. Поток  $\Phi_{aq}$  поперечной реакции якоря индуцирует в якоре поперечную ЭДС  $E_{aq}$ . Полная ЭДС  $E_\Sigma$  будет несколько больше основной ЭДС  $E$ .

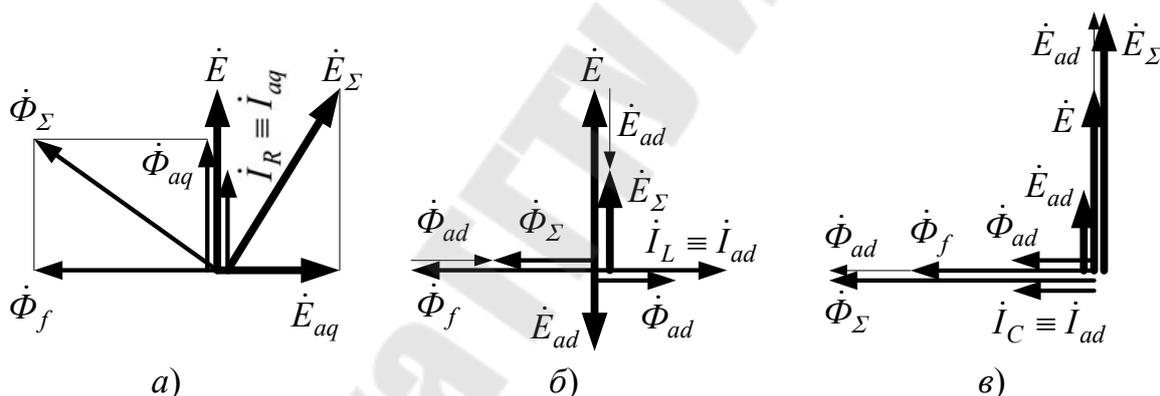


Рисунок 4.3 - Векторные диаграммы магнитных потоков, э.д.с. и токов при активной (а), индуктивной (б) и емкостной (в) нагрузках

### Нагрузка СГ индуктивная (рис. 4.3, б)

Магнитный поток ОВ  $\Phi_f$  наводит в статоре основную ЭДС  $E$ , отстающую от потока на  $90^\circ$ . ЭДС  $E$  создает в катушке индуктивности  $L$  отстающий от нее по фазе ток  $I_L$ . Ток  $I_L$  создаст в обмотке якоря магнитный поток  $\Phi_{ad}$  реакции якоря. Индекс « $d$ » в обозначении  $\Phi_{ad}$  подчеркивает тот факт, что, как следует из построений, поток  $\Phi_{ad}$  параллелен потоку  $\Phi_f$  и продольная ось  $d$  проводят по оси потока  $\Phi_f$  (рис. 4.1, в). Также продольным током  $I_{ad}$  нужно считать ток  $I_L$ . Полный поток  $\Phi_\Sigma$  равен арифметической разности потоков  $\Phi_f$  и  $\Phi_{ad}$  и будет минимально возможным. Явление уменьшения суммарного потока СГ называется его размагничиванием СГ.

Следовательно, реакция якоря при индуктивной нагрузке СГ является чисто размагничивающей. Поток  $\Phi_{ad}$  продольной реакции якоря индуцирует в якоре продольную ЭДС  $E_{ad}$ . Полная ЭДС  $E_{\Sigma}$  будет меньше  $E$ .

### Нагрузка СГ емкостная (рис. 4.3, в)

Магнитный поток ОВ  $\Phi_f$  наводит в статоре основную ЭДС  $E$ , отстающую от потока на  $90^\circ$ . ЭДС  $E$  создает в конденсаторе  $C$  опережающий ее по фазе ток  $I_C$ . Ток  $I_C$  в обмотке якоря магнитный поток  $\Phi_{ad}$  реакции якоря. Индекс «*d*» в обозначении  $\Phi_{ad}$  подчеркивает тот факт, что, как следует из построений, поток  $\Phi_{ad}$  параллелен потоку  $\Phi_f$ , и продольная ось *d* проводят по оси потока  $\Phi_f$  (рис. 4.1, в). Также продольным током  $I_{ad}$  нужно считать ток  $I_C$ . Полный поток  $\Phi_{\Sigma}$  равен арифметической сумме потоков  $\Phi_f$  и  $\Phi_{ad}$  и будет максимально возможным. Явление увеличения суммарного потока СГ называется его подмагничиванием СГ. Следовательно, реакция якоря при емкостной нагрузке СГ является чисто подмагничивающей. Поток  $\Phi_{ad}$  продольной реакции якоря индуцирует в якоре продольную ЭДС  $E_{ad}$ . Полная ЭДС  $E_{\Sigma}$  будет больше  $E$ .

### Нагрузка СГ смешанная (рис. 4.4)

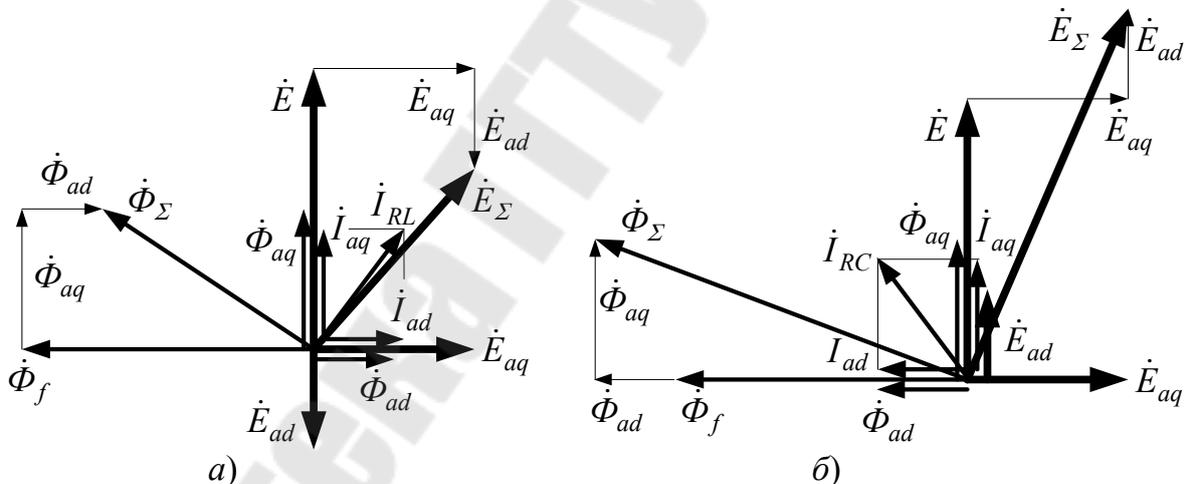


Рисунок 4.4 - Векторные диаграммы магнитных потоков, э.д.с. и токов при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

Опишем описание построения диаграмм для активно-индуктивной нагрузки (рис. 4.4, а). Магнитный поток ОВ  $\Phi_f$  наводит в статоре основную ЭДС  $E$ , отстающую от потока на  $90^\circ$ . ЭДС  $E$  создает в нагрузке отстающий от нее по фазе ток  $I_{RL}$ . Спроектировав вектор тока  $I_{RL}$  на продольную и поперечную оси, получим его составляющие  $I_{ad}$  и  $I_{aq}$ . Каждая составляющая  $I_{ad}$  и  $I_{aq}$  полного тока  $I_{RL}$  создаст в якоре совпадающие с ними по фазе магнитные потоки  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$ . Векторной суммой потоков  $\Phi_f$ ,  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$  является поток  $\Phi_{\Sigma}$ . Каждый из магнитных потоков  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$  наведет в якоре ЭДС

$E_{ad}$  и  $E_{aq}$ , отстающие от потоков на  $90^\circ$ . Векторной суммой ЭДС  $E$ ,  $E_{ad}$  и  $E_{aq}$  является ЭДС  $E_\Sigma$ .

Аналогично строится диаграмма для активно-емкостной нагрузки (рис. 4.4, б). Приведенные на рис. 4.4 построения, когда токи, потоки и ЭДС представляются в виде своих составляющих по осям  $d$  и  $q$  СГ, называются методом двух реакций.

### Вопросы и задания

1. Поясните построения векторной диаграммы при активной нагрузке СГ.
2. Поясните построения векторной диаграммы при индуктивной нагрузке СГ.
3. Поясните построения векторной диаграммы при емкостной нагрузке СГ.
4. Поясните построения векторной диаграммы при активно-индуктивной нагрузке СГ.
5. Поясните построения векторной диаграммы при активно-емкостной нагрузке СГ.

### 4.3 Уравнения электрического состояния и векторная диаграмма явнополюсного СГ

Уравнение электрического состояния нагруженного СГ, составленного по 2-му закону Кирхгофа, имеет вид

$$\dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_p = \dot{U} + R_a \dot{I}, \quad (4.4)$$

где  $E$  – ЭДС, наведенная в якоре механически вращающимся полем ОВ  $\Phi_f$

$E_{ad}$  – ЭДС продольной реакции якоря, наведенная в якоре электрически вращающимся продольным полем  $\Phi_{ad}$  якоря;

$E_{aq}$  – ЭДС поперечной реакции якоря, наведенная в якоре электрически вращающимся поперечным полем  $\Phi_{aq}$  якоря;

$E_{ap}$  – ЭДС рассеяния, созданная переменными потоками рассеяния якоря;

$U$  – напряжение на нагрузке (выводах СГ);

$I$  – ток якоря и в нагрузке СГ;

$R_a I$  – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря.

Как следует из графиков на рис. 4.2, а и формулы (4.3):

- 1) ЭДС  $E$  отстает от порождающего ее потока на  $90^\circ$ ;
- 2) ЭДС  $E$  прямо пропорциональна магнитному потоку  $\Phi_t$ .

Для ненасыщенного магнитопровода амплитуда магнитного потока  $\Phi_t$  прямо пропорциональна амплитуде тока  $I_t$  в катушке, создающем этот поток, и сдвиг по фазе между потоком  $\Phi$  и током  $I$  нулевой.

Следовательно:

1) ЭДС  $E$  прямо пропорциональна току  $I$  в катушке;

2) ЭДС  $E$  отстает от тока в катушке на  $90^\circ$ .

Значит для любой ЭДС, входящей в формулу (4.4), можно записать

$$\dot{E} = -jx\dot{I}, \quad (4.5)$$

где  $x$  – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления (Ом).

С учетом (4.5) уравнение (4.4) может быть преобразовано к виду

$$\begin{aligned} \dot{E} - jx_{ad}\dot{I}_{ad} - jx_{aq}\dot{I}_{aq} - jx_p\dot{I} &= \dot{U} + R_a\dot{I} \Rightarrow \\ \Rightarrow \dot{E} &= \dot{U} + jx_{ad}\dot{I}_{ad} + jx_{aq}\dot{I}_{aq} + jx_p\dot{I} + R_a\dot{I}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где  $x_{ad}$  и  $x_{aq}$  – индуктивные сопротивления реакции якоря по осям  $d$  и  $q$ .

В соответствии с методом двух реакций (рис. 4.4), ток якоря  $I$  представляется в виде векторной суммы продольной  $I_{ad}$  и поперечной  $I_{aq}$  его составляющих:

$$\dot{I} = \dot{I}_{ad} + \dot{I}_{aq}. \quad (4.7)$$

Подставляем (4.7) в (4.6):

$$\dot{E} = \dot{U} + jx_{ad}\dot{I}_{ad} + jx_{aq}\dot{I}_{aq} + jx_p\dot{I}_{ad} + jx_p\dot{I}_{aq} + R_a\dot{I}. \quad (4.8)$$

Для построения векторной диаграммы по уравнению (4.6) необходимо задать напряжение  $U$ , ток  $I$  нагрузки и сдвиг по фазе  $\varphi$  между ними.

Векторная диаграмма СГ строится по выражению (4.6) в последовательности (рис. 4.5, а):

1. Проводим из произвольно взятой точки  $O$  под произвольным углом вектор напряжения  $\dot{U}$ . По отношению к нему под углом  $\varphi$  проводим вектор тока  $\dot{I}$ .

2. Строим вектора  $R_a\dot{I}$  и  $jx_p\dot{I}$  падений напряжений на собственных сопротивлениях обмотки якоря и прибавляем их к вектору  $\dot{U}$  (согласно (4.6)).

3. Строим вспомогательный вектор  $jx_{aq}\dot{I}$  и прибавляем его к уже полученной сумме. Конец вектора  $jx_{aq}\dot{I}$  обозначим точкой  $l$ . Через точки  $O$

и  $I$  проводим прямую линию  $0-1$ , которая будет поперечной осью  $q$  построений. Перпендикулярно оси  $q$  под прямым отстающим углом проводим ось  $d$ .

4. Находим проекции  $\dot{I}_{ad}$  и  $\dot{I}_{aq}$  вектора тока на только что проведенные оси  $d-q$ . Обозначим угол между найденными проекциями как угол  $\alpha$ .

5. Проектируем вспомогательный вектор  $jx_{aq}\dot{I}$  на оси  $d-q$ . Проекциями будут отрезки  $2-3$  и  $1-3$ . Угол  $2-1-3$  равен углу  $4-0-5$  по свойству взаимной перпендикулярности их сторон, т.е. угол  $2-1-3$  равен  $\alpha$ . Два треугольника, образованных точками  $2-1-3$  и  $4-0-5$  их вершин, прямоугольные и, поэтому подобные. По свойству подобия этих треугольников:

$$\frac{\overline{2-3}}{\overline{1-2}} = \frac{I_{aq}}{I} \Rightarrow \frac{\overline{2-3}}{jx_{aq}\dot{I}} = \frac{I_{aq}}{I} \Rightarrow \overline{2-3} = jx_{aq}\dot{I}_{aq}. \quad (4.9)$$

Вектор  $jx_{aq}\dot{I}_{aq}$  присутствует в сумме (4.6) и, следовательно, точка 3 является концом вектора суммы  $\dot{U} + jx_{aq}\dot{I}_{aq} + jx_p\dot{I} + R_a\dot{I}$ .

6. Из точки 3 проводим вектор  $jx_{ad}\dot{I}_{ad}$  до точки 6. Соединяем точки 0 и 6. Отрезок  $0-6$  является вектором  $\dot{E}$ .

Построение векторной диаграммы завершено.

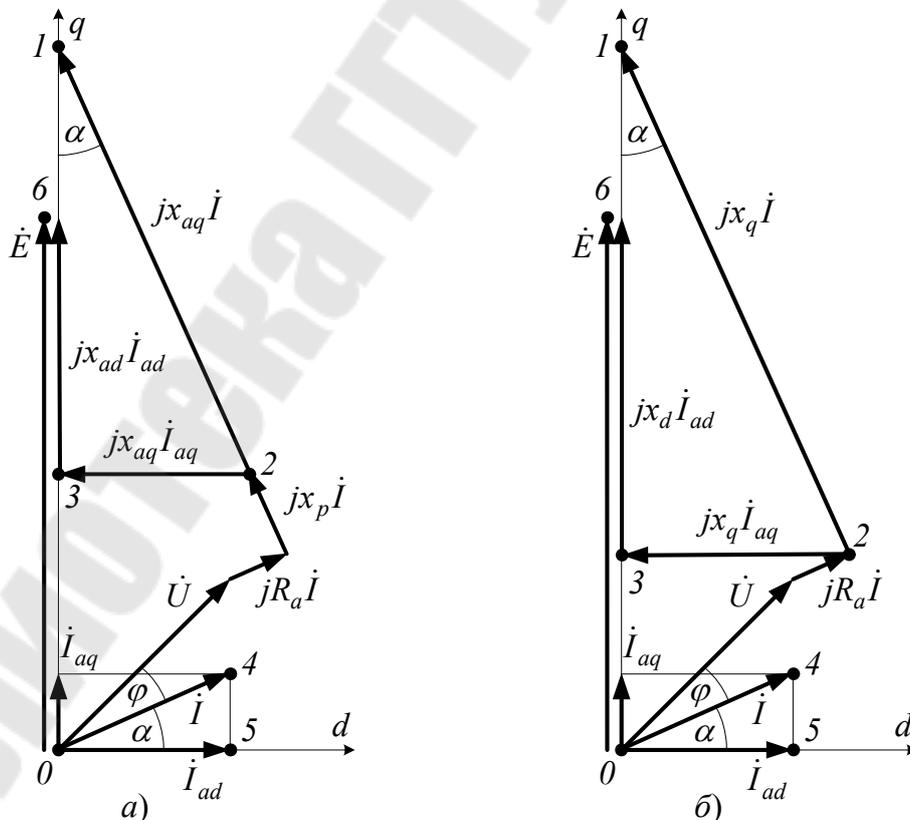


Рисунок 4.5 - Векторные диаграммы явнополюсного СГ

Практическое применение векторной диаграммы:

- если заданы напряжение  $U$ , ток  $I$  нагрузки и сдвиг по фазе  $\varphi$  между ними, то может быть определена величина ЭДС  $E$ , которая может обеспечить заданный режим работы нагрузки;

- если задана ЭДС СГ, то можно определить напряжение на нагрузке, для которой известны лишь активная и реактивная составляющие ее сопротивления.

В теории СГ часто используют модифицированное уравнение, выводимое из (4.8) следующими преобразованиями:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{U} + jx_{ad}\dot{I}_{ad} + jx_{aq}\dot{I}_{aq} + jx_p\dot{I}_{ad} + jx_p\dot{I}_{aq} + R_a\dot{I} = \\ &= \dot{U} + j(x_{ad} + x_p)\dot{I}_{ad} + j(x_{aq} + x_p)\dot{I}_{aq} + R_a\dot{I} = \\ &= \dot{U} + jx_d\dot{I}_{ad} + jx_q\dot{I}_{aq} + R_a\dot{I},\end{aligned}\quad (4.10)$$

где  $x_d = x_{ad} + x_p$  – синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси;

$x_q = x_{aq} + x_p$  – синхронное индуктивное сопротивление генератора по поперечной оси;

Векторная диаграмма, построенная по уравнению (4.10), приведена на рис. 4.5, б.

### Вопросы и задания

1. Поясните вывод уравнения (4.4) СГ.
2. Поясните вывод уравнения (4.6) СГ.
3. Поясните вывод уравнения (4.8) СГ.
4. Поясните построение векторной диаграммы явнополюсного СГ.
5. Поясните построение векторной диаграммы явнополюсного СГ по модифицированному уравнению.

### 4.4 Уравнения электрического состояния и векторная диаграмма неявнополюсного СГ

Неявнополюсным СГ называется генератор, у которого обмотка ОВ располагается не на профилированном сердечнике, форме вытянутого по оси  $d$  (рис. 4.1, а), а на сердечнике круглой формы, имеющего одинаковые размеры по осям  $d$  и  $q$ . ОВ укладывается в пазы, прорезанные на поверхности круглого ротора. Синусоидальное распределение поля такой ОВ достигается соответствующей укладкой в пазы провода обмотки. Неявнополюсные СГ изготавливаются на частоты вращения ротора, равными 3000

об/мин и 1500 об/мин. На меньшие частоты вращения СГ применяются явнополюсных СГ.

У неявнополюсного СГ по обеим осям  $d$  и  $q$  одинаковые синхронные индуктивные сопротивления реакции якоря  $x_d$  и  $x_q$  и они обозначаются как сопротивление  $x_a$ . С учетом этого, уравнение (4.10) примет вид

$$\dot{E} = \dot{U} + jx_a \dot{I}_{ad} + jx_a \dot{I}_{aq} + R_a \dot{I} = \dot{U} + jx_a \underbrace{(\dot{I}_{ad} + \dot{I}_{aq})}_{i \text{ по (4.7)}} + R_a \dot{I} = \dot{U} + jx_a \dot{I} + R_a \dot{I}. \quad (4.11)$$

Для построения векторной диаграммы по уравнению (4.11) необходимо задать напряжение  $U$ , ток  $I$  нагрузки и сдвиг по фазе  $\varphi$  между ними.

Векторная диаграмма СГ строится в последовательности (рис. 4.6):

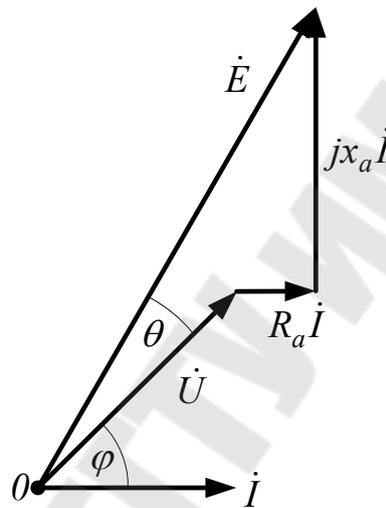


Рисунок 4.6 - Векторная диаграмма неявнополюсного СГ

1. Проводим из произвольно взятой точки  $0$  под произвольным углом вектор напряжения  $\dot{U}$ . По отношению к нему под углом  $\varphi$  проводим вектор тока  $\dot{I}$ .

2. Строим вектор  $R_a \dot{I}$  падения напряжения на активном сопротивлении обмотки якоря и прибавляем их к вектору  $\dot{U}$  (согласно (4.11)).

3. Строим вектор  $jx_a \dot{I}$  падения напряжения, обусловленное реакцией якоря, и прибавляем их к сумме  $\dot{U} + jx_a \dot{I}$  (согласно (4.11)).

4. Соединяем точку  $0$  с концом вектора  $jx_a \dot{I}$  и получаем вектор  $\dot{E}$ .

На диаграмме отмечен угол  $\theta$  между векторами напряжения  $\dot{U}$  и ЭДС  $\dot{E}$ . Этот угол называется углом нагрузки и с ним связаны расчеты активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей, отдаваемой СГ в нагрузку и противодействующий дизелю тормозной момент.

## Вопросы и задания

1. Как устроен неявнополюсный СГ и каким уравнением электрического состояния он описывается?
3. Где применяют неявнополюсные СГ?
2. Поясните построение векторной диаграммы неявнополюсного СГ.

### 4.5 Упрощенные уравнения электрического состояния и векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных СГ

Основная проблема при использовании в расчетах приведенных выше уравнений явнополюсного и неявнополюсного СГ состоит в том, что выводимые из них формулы электрических мощностей и тормозного момента СГ чрезвычайно громоздки и, поэтому, неудобные для практического применения.

Существенное упрощение указанных формул достигается при том, что из уравнений и векторных диаграмм исключено активное сопротивление  $R_a$  обмотки якоря. У реально используемых на электростанциях СГ между величинами его сопротивлений существуют следующие «сильные» неравенства:  $R_a \ll x_d$ ,  $R_a \ll x_q$  и  $R_a \ll x_a$ . Эти соотношения позволяют пренебречь сопротивлением  $R_a$  без заметного увеличения погрешности расчетов характеристик СГ.

Упрощенное уравнение явнополюсного СГ, следующее из (4.10), имеет вид:

$$\dot{E} = \dot{U} + jx_d \dot{I}_{ad} + jx_q \dot{I}_{aq}. \quad (4.12)$$

Упрощенная векторная диаграмма явнополюсного СГ, следующая из рис. 4.5, б при  $R_a = 0$ , имеет вид, приведенный на рис. 4.7, а.

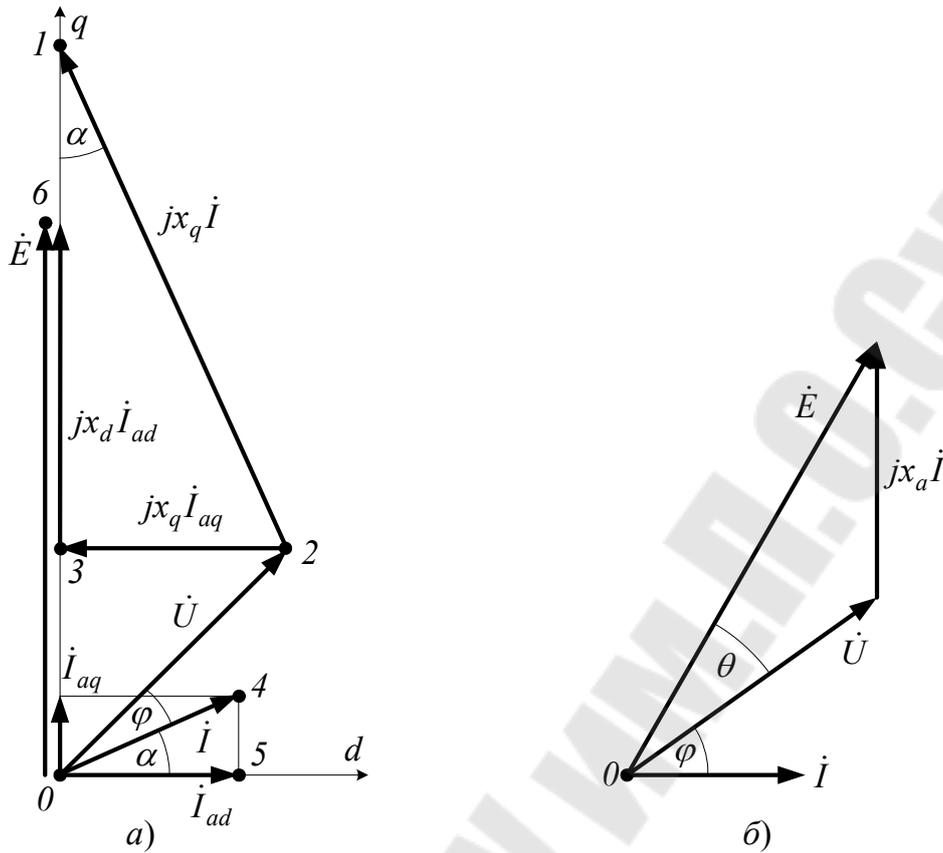


Рисунок 4.7 - Упрощенные векторные диаграммы явнополюсного (а) и неявнополюсного (б) СГ

Упрощенное уравнение неявнополюсного СГ, следующее из (4.11), имеет вид:

$$\dot{E} = \dot{U} + jx_a \dot{I}. \quad (4.13)$$

Упрощенная векторная диаграмма неявнополюсного СГ, следующая из рис. 4.6 при  $R_a = 0$ , имеет вид, приведенный на рис. 4.7, б.

### Вопросы и задания

1. Как выводятся упрощенные уравнения явнополюсного и неявнополюсного СГ?
2. Поясните построения векторных диаграмм для явнополюсного и неявнополюсного СГ.

## 4.6 Характеристики холостого хода, нагрузочная и короткого замыкания СГ

Среди разнообразных характеристик синхронных генераторов отдельную группу составляют характеристики, которые определяют зависимость между напряжением на зажимах якоря  $U$ , током якоря  $I$  и током возбуждения  $I_f$  при  $f=f_{ном}$  или  $n=n_{ном}$  и  $\varphi=const$  в установившемся режиме работы. Эти характеристики дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов и могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм, или по данным соответствующих опытов. Характеристики явнополюсных и неявнополюсных генераторов в основном одинаковы.

Характеристика холостого хода (х.ХХ) определяет зависимость  $E=f(I_f)$  при  $I=0$  и  $f=f_{ном}$ . Если х.ХХ различных синхронных генераторов изобразить в относительных единицах, то они будут мало отличаться друг от друга. Такие х.ХХ называются нормальными (рис. 4.8). Форма х.ХХ повторяет форму без-гистерезисной кривой намагничивания электротехнической стали магнитопровода обмотки возбуждения СГ.

Характеристика короткого замыкания (х.КЗ) снимается при замыкании зажимов всех фаз обмотки якоря накоротко (симметричное короткое замыкание) и определяет зависимость  $I=f(I_f)$  при  $U=0$  и  $f=f_{ном}$ .

Если пренебречь весьма незначительным активным сопротивлением якоря ( $R_a=0$ ), то сопротивление цепи якоря в режиме короткого замыкания будет чисто индуктивным. Поэтому  $\varphi=90^\circ$ ,  $I_q=0$ ,  $I_d=I$  (рис. 4.3, б) и на основании выражения (4.12):

$$\dot{E} = ix_d \dot{I}. \quad (4.14)$$

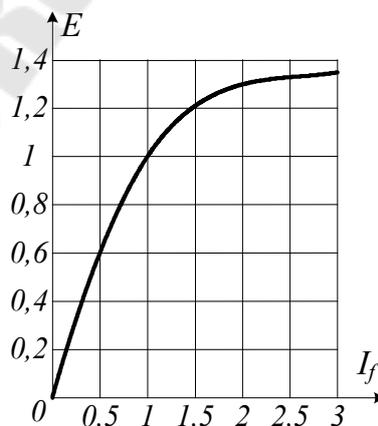


Рисунок 4.8 – Нормальная характеристика холостого хода СГ

Уравнению (4.14) соответствуют схема замещения рис. 4.9, а и векторная диаграмма рис. 4.9, б.

При коротком замыкании реакция якоря является чисто размагничивающей, поток  $\Phi_a$  мал. Поэтому при коротком замыкании магнитная цепь не насыщена и х.КЗ  $I=f(I_f)$  прямолинейна (рис. 4.10).

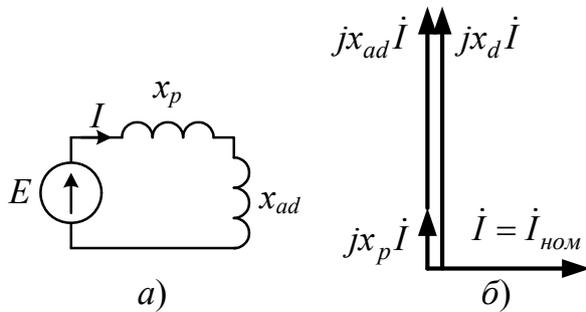


Рисунок 4.9 - Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) СГ при к.з.

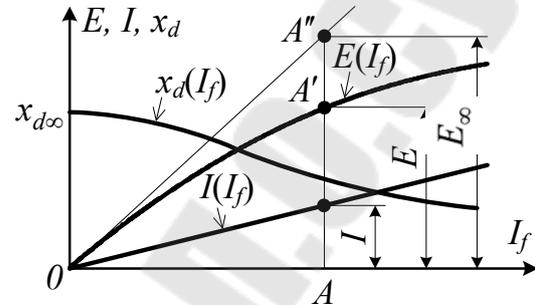


Рисунок 4.10 - Характеристики х.х. ( $E$ ) и короткого замыкания ( $I$ ) СГ

По х.ХХ и х.КЗ (рис. 4.10) можно рассчитать:

1. Значение продольного синхронного сопротивления  $x_d$ . Обычно находят ненасыщенное значение этого сопротивления  $x_{d\infty}$ , которое в отличие от насыщенного значения  $x_d$  для каждой машины вполне определенное. Чтобы определить  $x_{d\infty}$ , для какого-либо значения тока возбуждения, например  $I_f=OA$  по спрямленной ненасыщенной х.ХХ  $A''$  находят  $E_\infty=AA''$  и по х.КЗ – ток  $I$ , после чего в соответствии с равенством (4.14) вычисляют

$$x_{d\infty} = \frac{E_\infty}{I}.$$

Если вместо  $E_\infty$  в равенство (4.14) подставить значение  $E=AA'$  для того же значения  $I_f$ , то насыщенное значение  $x_d$ :

$$x_d = \frac{E}{I}. \quad (4.15)$$

2. Отношение короткого замыкания (о.КЗ). Отношением короткого замыкания ко.КЗ называется отношение к номинальному току якоря  $I_{ном}$  установившегося тока короткого замыкания  $I_{к.з.у}$  при токе возбуждения, который при холостом ходе и  $n=n_{ном}$  дает  $E=U_{ном}$ :

$$k_{о.к.з.} = \frac{I_{к.з.у}}{I_{ном}}. \quad (4.16)$$

При  $E=U_{ном}$  и в соответствии (4.15):

$$I_{к.з.у} = \frac{U_{ном}}{x_d}. \quad (4.17)$$

На основании выражений (4.16) и (4.17):

$$k_{о.к.з.} = \frac{I_{к.з.у}}{I_{ном}} = \frac{U_{ном}}{x_d I_{ном}} = \frac{z_{баз}}{x_d} = \frac{1}{x_{d(о.е)}}, \quad (4.18)$$

то есть о.КЗ равно обратному значению  $x_{d(о.е)}$ . У большинства машин  $x_{d(о.е)} > 1$ , и тогда  $k_{о.к.з.} < 1$ , ток короткого замыкания в указанных условиях меньше номинального. Отсюда можно сделать вывод, что установившийся ток короткого замыкания синхронных генераторов с режима холостого хода вообще не очень велик, что объясняется сильной размагничивающей реакцией якоря.

Поэтому параметр о.КЗ является важным параметром синхронных машин. У судовых СГ обычно  $k_{о.к.з.} = 0,5 \dots 1,2$ .

Нагрузочная характеристика определяет зависимость  $U=f(I_f)$  при  $I=const$ ,  $\cos\varphi=const$  и  $f=const$  и показывает, как изменяется напряжение генератора  $U$  с изменением тока возбуждения  $I_f$  при условии постоянства тока нагрузки  $I$  и  $\cos\varphi$ . Из числа разнообразных нагрузочных характеристик наибольший практический интерес представляет так называемая индукционная нагрузочная характеристика (кривая 2 на рис. 4.11, а), которая соответствует чисто индуктивной нагрузке генератора, когда  $\cos\varphi=0$  (инд.), снимаемая при  $I=I_{ном}$ .

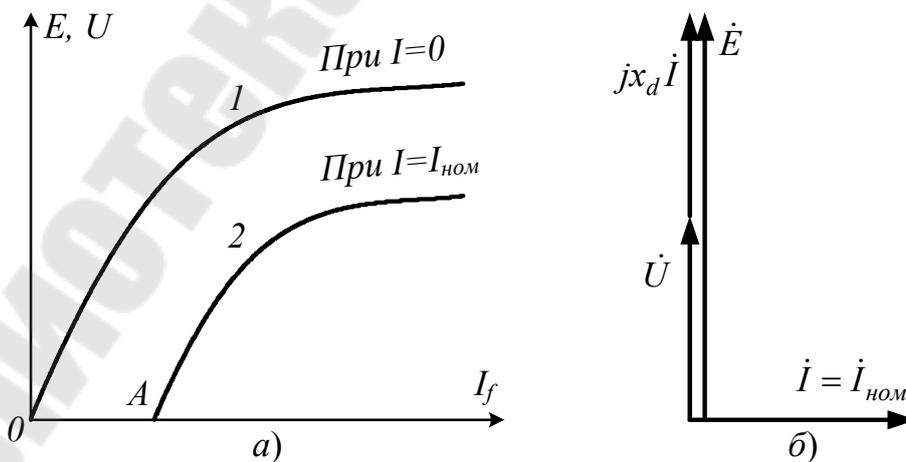


Рисунок 4.11 - Индукционная нагрузочная характеристика СГ (а) и векторная диаграмма (б) нагрузочного режима

Векторная диаграмма синхронного генератора при  $\cos\varphi=0$  (инд.) изображена на рис. 4.11, б, причем принято  $R_a=0$ . Из этой диаграммы видно, что в режиме индукционной характеристики существует чисто продольная размагничивающая реакция якоря ( $I_q=I\cdot\cos\varphi=0$ ,  $I_d=I\cdot\sin\varphi=I$ ). Поэтому индукционная характеристика (кривая 2 на рис. 4.11, а) идет ниже характеристики холостого хода (кривая 1). Точка А соответствует симметричному установившемуся короткому замыканию генератора при  $I=I_{ном}$ , когда  $U=0$ .

По совокупности х.ХХ и нагрузочной характеристики можно рассчитать внешние и регулировочные характеристики СГ.

### Вопросы и задания

1. Дайте определение характеристике холостого хода и поясните вид графика ее.
2. Дайте определение характеристике короткого замыкания и поясните вид графика ее.
3. Какие величины можно рассчитать по х.ХХ и х.КЗ?
4. Дайте определение нагрузочной характеристике и поясните график ее.

### 4.7 Внешние характеристики СГ

Внешняя характеристика определяет зависимость  $U=f(I)$  при  $I_f=const$ ,  $\cos\varphi=const$ ,  $f=f_{ном}$  и показывает, как изменяется напряжение СГ  $U$  при изменении тока нагрузки  $I$  и неизменном токе возбуждения. Так как ток возбуждения и частота вращения СГ постоянны, то будет постоянной ЭДС  $E$  СГ (рис. 4.8).

Для определения вида графика внешней характеристики используем построения по упрощенной векторной диаграмме неявнополюсного СГ (рис. 4.7, б). Рассмотрим работу СГ на активную ( $R$ ), активно-индуктивную ( $RL$ ) и активно-емкостную ( $RC$ ) нагрузку (рис. 4.12).

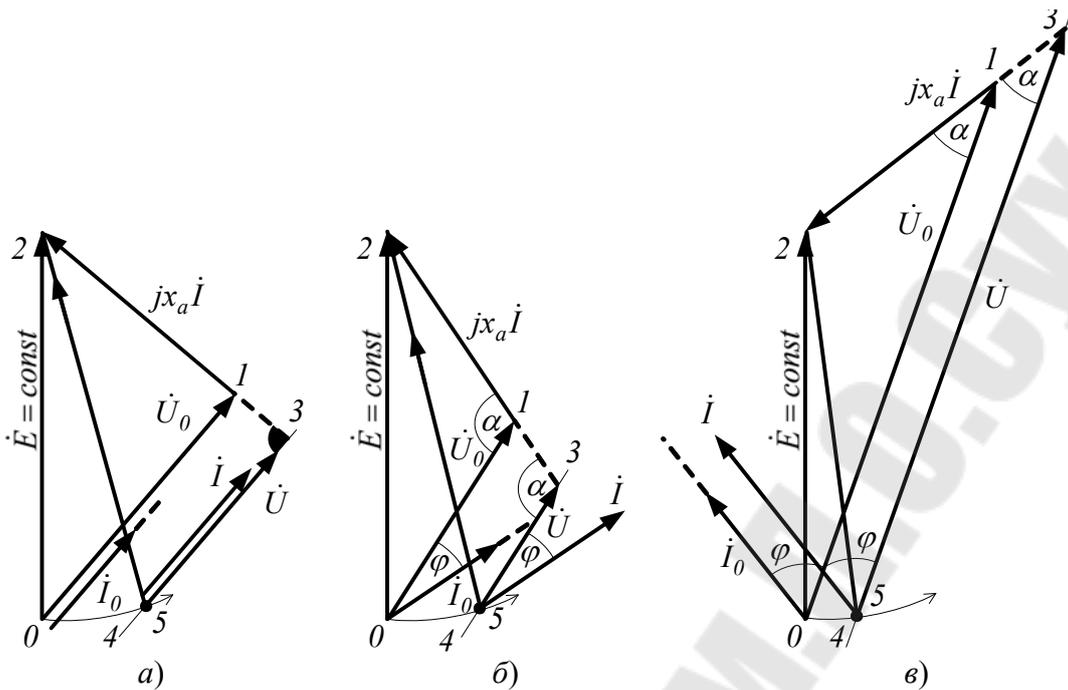


Рисунок 4.12 - Векторные диаграммы для расчета внешних характеристик при активной (а), активно-индуктивной (б) и активно-емкостной (в) нагрузках

Нагрузка СГ активная, между током и напряжением нагрузки сдвиг по фазе нулевой –  $\varphi=0$  (рис. 4.12, а).

Примем вначале ток нагрузки равным  $I_0$  и напряжение на нагрузке, найденное из диаграммы 0-1-2, равняется  $U_0$ . Пусть ток в нагрузке увеличился до  $I$  (на диаграмме прирост тока показан пунктирной линией на продолжении вектора  $I_0$ ). Тогда падение напряжения  $jx_a I$  увеличится, точка 1, ограничивающая длину этого вектора, переместится в точку 3. Новый вектор напряжения  $U$  будет входить в точку 3 под углом  $90^\circ$  по направлению прямой линии 3-4, так как с вектором тока  $I$  при любой величине тока  $I$  вектор напряжения  $U$  будет параллелен (нагрузка активная), вектор  $jx_a I$  будет опережать на  $90^\circ$  и, следовательно, между векторами  $U$  и  $jx_a I$  будут постоянные  $90^\circ$ . Повернем вектор ЭДС  $E$  против часовой стрелки относительно точки 2 до его пересечения с линией 3-4. Точку пересечения обозначим как 5. Отрезок 3-5 линии 3-4 будет вектором напряжения  $U$ . Как следует из построений,  $U < U_0$ . Значит, при активной нагрузке с увеличением тока напряжение на ней уменьшается.

Нагрузка СГ активно-индуктивная, напряжение на нагрузке опережает ток в ней на угол  $\varphi > 0$  (рис. 4.12, б).

Построения такие же, как и для активной нагрузки. При активно-индуктивной нагрузке с увеличением тока напряжение на ней уменьшается интенсивнее, чем при активной нагрузке (так как  $\alpha > 90^\circ$ ).

Нагрузка СГ активно-емкостная, напряжение на нагрузке отстает от тока в ней на угол  $\varphi < 0$  (рис. 4.12, в).

Построения такие же, как и для активной нагрузки. При активно-емкостной нагрузке с увеличением тока напряжение на ней увеличивается.

Из общего анализа векторных диаграмм на рис.4.12 следует:

- при холостом ходе, когда ток  $I=0$ , напряжения  $U$  на выводах СГ одинаковые и равны ЭДС  $E$  холостого хода;

- при одинаковых токах  $I$  в нагрузках, напряжение  $U$  на активной нагрузке меньше  $E$ , еще меньше  $U$  при активно-индуктивной нагрузке, а напряжение  $U$  на активно-емкостной нагрузке может превышать  $E$  (при достаточном преобладании емкостной составляющей полного сопротивления над активной составляющей);

- с увеличением тока  $I$  напряжение  $U$  на активной и активно-индуктивной нагрузке продолжает уменьшаться, а напряжение  $U$  на активно-емкостной нагрузке продолжает повышаться.

Графики внешних характеристик СГ приведены на рис. 4.13.

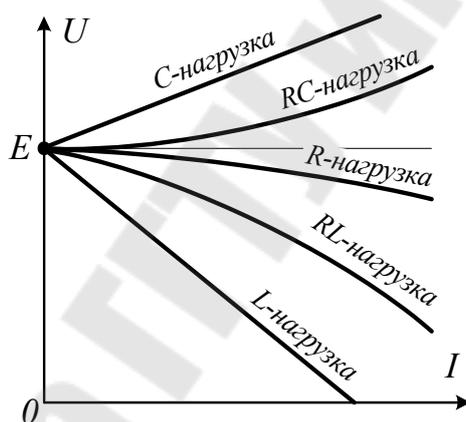


Рисунок 4.13 - Внешние характеристики СГ

### Вопросы и задания

1. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активной нагрузке.
2. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активно-индуктивной нагрузке.
3. Поясните построения для расчета внешней характеристики при активно-емкостной нагрузке.
4. Поясните внешний вид внешних характеристик СГ.

## 4.8 Регулировочные характеристики СГ

Регулировочная характеристика показывает то, как нужно изменять ток возбуждения  $I_f$ , чтобы напряжение на нагрузке было неизменным ( $U=const$ ) при  $\cos\varphi=const$ ,  $f=f_{ном}$ , но изменяющемся токе  $I$  нагрузки. Так как ток возбуждения  $I_f$  будет изменяться, то при определении регулировочных характеристик нужно будет использовать то свойство характеристик холостого хода (рис. 4.8), что для увеличения ЭДС  $E$  нужно увеличивать ток возбуждения  $I_f$ .

Для определения вида графика регулировочной характеристики используем построения по упрощенной векторной диаграмме неявнополусного СГ (рис. 4.7, б). Рассмотрим работу СГ на активную ( $R$ ), активно-индуктивную ( $RL$ ) и активно-емкостную ( $RC$ ) нагрузку (рис. 4.14).

### ***Нагрузка СГ активная (рис.4.14,а)***

Примем вначале ток нагрузки равным  $I_0$  и ЭДС  $E$ , найденная из диаграммы, равна  $E_0$ . Пусть ток в нагрузке увеличился до  $I$  (на диаграмме прирост тока показан пунктирной линией на продолжении вектора  $I_0$ ). Тогда падение напряжения  $jx_a I$  увеличится до  $jx_a I_0$ . Новый вектор ЭДС  $E$ , проведенный из точки  $0$  в конец вектора  $jx_a I$  будет длиннее вектора  $E_0$ . Это значит, что для поддержания постоянства напряжения  $U$  на нагрузке при увеличении тока  $I$  в ней нужно увеличить ток возбуждения  $I_f$ .

### ***Нагрузка СГ активно-индуктивная (рис. 4.14, б)***

Построения такие же, как и для активной нагрузки. При активно-индуктивной нагрузке с увеличением тока нужно интенсивнее увеличивать ЭДС  $E$  путем более интенсивного увеличения тока возбуждения  $I_f$ .

### ***Нагрузка СГ активно-емкостная (рис. 4.14, в)***

Построения такие же, как и для активной нагрузки. При активно-емкостной нагрузке с увеличением тока нагрузки  $I$  ток возбуждения  $I_f$  нужно уменьшать.

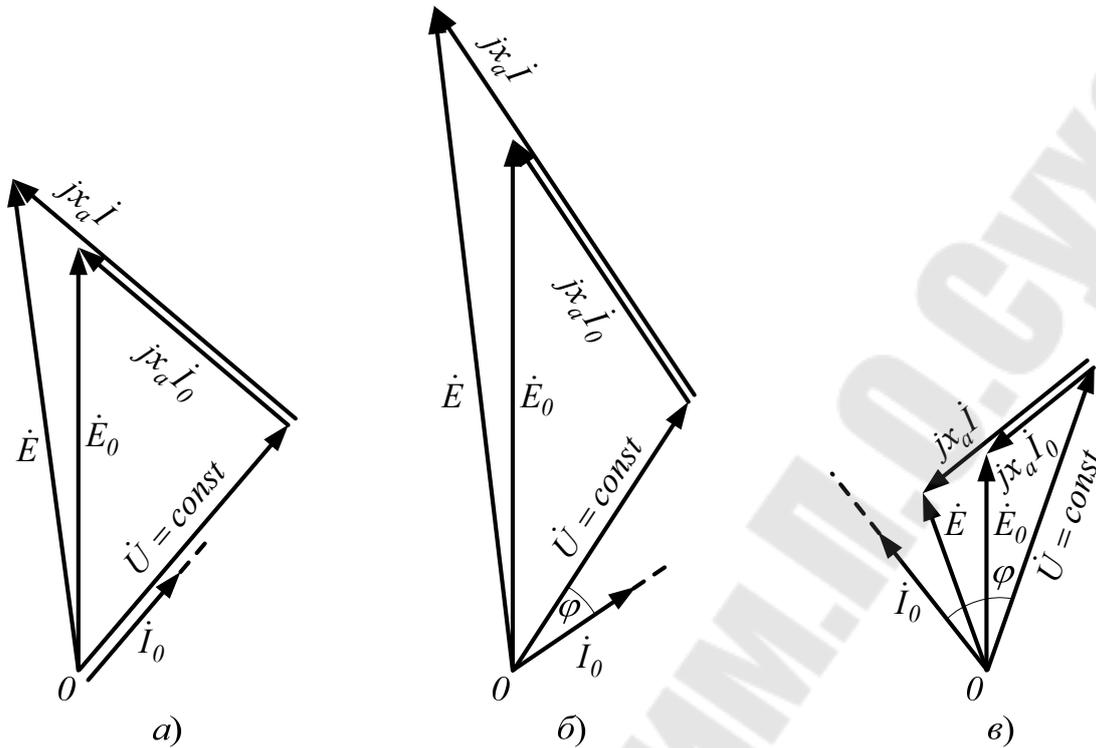


Рисунок 4.14 - Векторные диаграммы для расчета регулировочных характеристик: нагрузка активная (а), активно-индуктивная (б) и активно-емкостная (в)

Графики регулировочных характеристик СГ приведены на рис. 4.15.

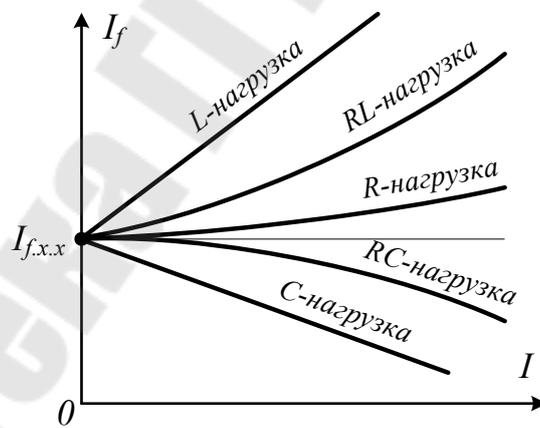


Рисунок 4.15 - Регулировочные характеристики СГ

Из общего анализа векторных диаграмм на рис. 4.14 следует:

- при холостом ходе, когда ток  $I=0$ , напряжения  $U$  на выводах СГ одинаковые и равны ЭДС  $E$  холостого хода и, следовательно, во всех случаях в обмотке возбуждения должен быть ток холостого хода  $I_{f,x.x}$ ;
- при одинаковых токах  $I$  в нагрузках, для поддержания постоянным напряжения  $U$  СГ нужно при активной нагрузке увеличивать ток  $I_f$ , при ак-

тивно-индуктивной нагрузке еще сильнее нужно увеличить ток  $I_f$ , а при активно-емкостной нагрузке ток  $I_f$  нужно уменьшать;

- с увеличением тока  $I$  нагрузки ток возбуждения  $I_f$  нужно продолжать увеличивать при активной и активно-индуктивной нагрузке, а при активно-емкостной нагрузке ток  $I_f$  нужно продолжать уменьшать.

### Вопросы и задания

1. Поясните построения для расчета регулировочной характеристики при активной нагрузке.

2. Поясните построения для расчета регулировочной характеристики при активно-индуктивной нагрузке.

3. Поясните построения для расчета регулировочной характеристики при активно-емкостной нагрузке.

4. Поясните внешний вид регулировочных характеристик СГ.

### 4.9 Мощность и электромагнитный момент СГ

При выводе формул активной мощности  $P$  и электромагнитного момента  $M$  используем построения (рис. 4.16) по упрощенной векторной диаграмме неявнополюсного СГ. На чертеже отображены:

- ЭДС  $E$  СГ и напряжение  $U$  на его выводах и, значит, на нагрузке;  
- сдвиг по фазе  $\varphi$  между напряжением  $U$  и током  $I$  нагрузки;  
- угол нагрузки  $\theta$  (такое название угла пояснено ниже), являющийся сдвигом по фазе между ЭДС  $E$  СГ и напряжением  $U$ .

Угол нагрузки  $\theta$  является практически равным сдвигу по фазе между магнитным потоком обмотки возбуждения  $\Phi_f$  и суммарным потоком  $\Phi_\Sigma$ , пронизывающего обмотку статора (рис. 4.4). Это следует из анализа уравнения (4.4) электрического состояния СГ. Составляющая  $\dot{E}_p$  ЭДС рассеяния якоря в (4.4) может быть представлена в виде  $\dot{E}_p = -jx_p \dot{I}$ . С учетом этого (4.4) представим как

$$\dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + (R_a + jx_p)\dot{I}. \quad (4.19)$$

Член  $(R_a + jx_p)\dot{I}$  является падением напряжения на сопротивлении  $R_a + jx_p$  обмотки якоря СГ. Эта падение напряжения меньше 5% от напряжения  $U$  и им обычно пренебрегают. Тогда уравнение (4.19) примет вид

$$\dot{E} + \underbrace{\dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}} \approx \dot{U} \Rightarrow \underbrace{\dot{E}_{\Sigma}} \approx \dot{U} \quad (4.20)$$

э.д.с. порождена потоком  $\Phi_f$  и отстаёт от него на угол  $90^\circ$      
 э.д.с. порождены потоками реакции якоря и отстают от потоков на угол  $90^\circ$      
 э.д.с. порождена потоком  $\Phi_{\Sigma}$  суммы всех потоков и отстаёт от него на угол  $90^\circ$      
 напряжение, совпадающее по величине и фазе с э.д.с.  $E_{\Sigma}$ , и также отстаёт от потока  $\Phi_{\Sigma}$  на угол  $90^\circ$

Из пояснений, приведенных в выражениях, входящих в (4.20), из базового определения угла  $\theta$  как сдвига по фазе между ЭДС  $E$  СГ и напряжением  $U$  (см. рис. 4.6) и из того факта, что между векторами потока и индуцированной им ЭДС угол равен  $90^\circ$  (рис. 4.4) следует, что угол  $\theta$  является одновременно углом между векторами потоков  $\Phi_f$  и  $\Phi_{\Sigma}$ . Магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$  является суммарным потоком, пронизывающим обмотку статора. Его упрощенно также принято называть как «магнитный поток статора». Следуя изложенному, на рис. 4.16 отложены вектора  $\dot{\Phi}_f$  и  $\dot{\Phi}_{\Sigma}$  перпендикулярно к векторам  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$ .

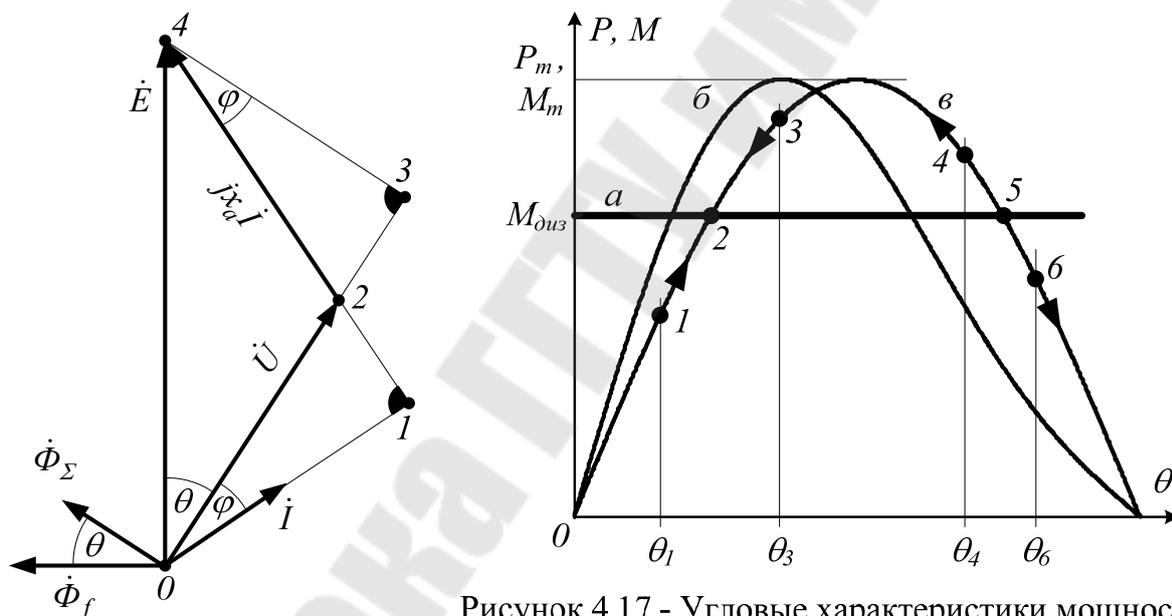


Рисунок 4.16 - К расчету мощности и момента СГ

Рисунок 4.17 - Угловые характеристики мощности (момента) явнополюсного (б) и неявнополюсного (в) СГ и моментная характеристика дизеля (а)

На чертеже вершинами отмечены два прямоугольных треугольника 2-3-4 и 0-3-4 и в них отмечены острые углы  $\varphi$  и  $\theta$ . Вычислим из указанных треугольников катет 3-4:

$$\overline{3-4} = \overline{2-4} \cdot \cos \varphi = \overline{0-4} \cdot \sin \theta,$$

$$\Downarrow$$

$$x_a I \cos \varphi = E \sin \theta \quad (4.21)$$

Умножим на  $U$  обе части последнего равенства системы (4.21) и затем раздели обе части на  $x_a$ :

$$UI \cos \varphi = \frac{EU}{x_a} \sin \theta \Rightarrow P_{1\text{фазы}} = \frac{EU}{x_a} \sin \theta \Rightarrow P = \frac{3EU}{x_a} \sin \theta, \quad (4.22)$$

где  $P_{1\text{фазы}}$  и  $P$  – активная мощность одной и трех фаз СГ.

Используя известную курса из технической механики формулу

$$P = M\omega,$$

находим из (4.22) противодействующий момент СГ:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{3EU}{\omega x_a} \sin \theta. \quad (4.23)$$

Для явнополюсного СГ формулы активной мощности и момента имеют вид

$$\begin{aligned} P &= \frac{3EU}{x_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \\ M &= \frac{3EU}{\omega x_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \end{aligned} \quad (4.24)$$

где первые слагаемые называют синхронной мощностью (моментом), а вторые – синхронно-реактивной мощностью (моментом).

Согласно выведенных формул такие энергетические характеристики СГ, как активная мощность и момент, которые определяют его нагрузочную способность, зависят они от синуса угла  $\theta$ . Поэтому угол  $\theta$  называют углом нагрузки СГ.

Построенные по формулам (4.22)–(4.24) графики  $P$  и  $M$  (графики б и в на рис. 4.17) называют угловыми характеристиками мощности (момента) СГ.

### Вопросы и задания

1. Дайте определение угла нагрузки СГ и поясните, почему угол между магнитными потоками обмотки возбуждения и обмотки статора тоже равен углу нагрузки?

2. Приведите вывод угловых характеристик мощности и момента неявнополюсного СГ.

## 4.10 Статическая устойчивость СГ

Проблема статической устойчивости СГ является сокращенным названием проблемы статической устойчивости дизель-генераторного агрегата (ДГА), состоящего из СГ и приводящего его во вращение дизеля. Далее, для определенности будем рассматривать статическую устойчивость ДГА с неявнополюсным СГ (график в на рис. 4.17).

Физические процессы в ДГА в установившемся режиме сводятся к следующему. Пусть мощность электрической нагрузки такова, что ей на угловой характеристике мощности СГ  $P(\theta)$  соответствуют точки 2 и 5. На подобной ей угловой характеристике момента СГ  $M(\theta)$  указанной нагрузке будут соответствовать те же точки 2 и 5. Далее на плоскость графиков угловых характеристик наносим моментную характеристику дизеля ( $a$ ), которая представляет зависимость вращающего момента  $M_{\text{диз}}$  дизеля от угла  $\theta$ . Вращающий момент  $M_{\text{диз}}$  дизеля зависит только от количества сжигаемого им топлива и совершенно не зависит от угла нагрузки  $\theta$ . Поэтому, график моментной характеристики  $M_{\text{диз}}$  параллелен оси  $\theta$ . Работа ДГА описывается уравнением механики:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{диз}} - M, \quad \text{причем} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}. \quad (4.25)$$

Необходимым условием существования установившегося режима, для которого должны быть неизменны как частота вращения  $\omega$ , так и угол  $\theta$ , является равенство моментов  $M(\theta)$  и  $M_{\text{диз}}$ , так как при этом производные от  $\omega$  и  $\theta$  будут равны нулю. Точками установившегося режима являются точки 2 и 5.

Чтобы работа ДГА в точках установившегося режима была устойчивой, должны быть выполнены еще и достаточные условия, суть которых излагается ниже.

Проанализируем на устойчивость работу ДГА в точке 2.

Пусть случайно угол нагрузки  $\theta$  уменьшился и по угловой характеристике момента сместились в точку 1. Тогда при угле  $\theta_1$  момент дизеля  $M_{\text{диз}}$  окажется больше момента  $M$  генератора и, в соответствии с (4.25) частота вращения и вслед за ней и угол  $\theta$  будет возрастать. В результате ДГА вернется в точку 2.

Пусть случайно угол нагрузки  $\theta$  увеличился и по угловой характеристике момента сместились в точку 3. Тогда при угле  $\theta_3$  момент дизеля  $M_{\text{диз}}$  окажется меньше момента  $M$  генератора и, в соответствии с (4.25) частота вращения и вслед за ней и угол  $\theta$  будет убывать. ДГА вернется опять же в точку 2.

Таким образом, работа ДГА в точке 2 устойчива.

Проанализируем теперь на устойчивость работу ДГА в точке 5.

Пусть случайно угол нагрузки  $\theta$  уменьшился и по угловой характеристике момента сместились в точку 4. Тогда при угле  $\theta_4$  момент дизеля  $M_{диз}$  окажется меньше момента  $M$  генератора и, в соответствии с (4.25) частота вращения и вслед за ней и угол  $\theta$  будет убывать. ДГА вернется опять же в точку 2.

Пусть случайно угол нагрузки  $\theta$  увеличился и по угловой характеристике момента сместились в точку 6. Тогда при угле  $\theta_6$  момент дизеля  $M_{диз}$  окажется больше момента  $M$  генератора и, в соответствии с (4.25) частота вращения и вслед за ней и угол  $\theta$  будет возрастать. В результате ДГА будет наращивать угол  $\theta$ , все дальше уходя от точки 5.

Таким образом, работа ДГА в точке 5 неустойчива.

В связи с изложенным, восходящий участок угловой характеристики СГ является рабочим, так как работа на нем устойчива, а на ниспадающем участке устойчивая работа СГ невозможна.

### **Вопросы и задания**

1. Обоснуйте необходимые условия существования установившегося режима работы ДГА.
2. Обоснуйте достаточные условия существования устойчивого установившегося режима работы ДГА.

### **4.11 Условия параллельной работы СГ.**

#### **Включение СГ на параллельную работу**

В сетях электроснабжения переменного тока устанавливается не менее двух СГ, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного СГ):

- 1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного СГ.
- 2). Обеспечивается экономичная работа параллельно работающих СГ, в которой загрузка СГ может поддерживаться на уровне, обеспечивающем максимальный КПД. Так, если нагрузка двух параллельно работающих СГ составляет менее половины, то при выводе из работы одного СГ, оставшийся в работе СГ загрузится выше половины, а это всегда приводит к повышению КПД СГ.
- 3). Исключается перегрузка СГ. Так, если работающие СГ нагружены токами сверх номинальных, то введением дополнительно в работу еще одного СГ, который возьмет на себя часть тока нагрузки, другие СГ разгружаются.

Различают параллельную работу СГ:

- на сеть бесконечной мощности;
- соизмеримой между собой мощности.

Существуют три способа введения СГ для работы в параллель с сетью (уже работающими генераторами):

- 1) точная синхронизация;
- 2) грубая синхронизация;
- 3) самосинхронизация.

Подключаемый к сети СГ работает вхолостую и, поэтому напряжение на выводах СГ равно его ЭДС  $E$ .

Способ точной синхронизации. Схема способа точной синхронизации приведена на рис. 4.18, а). СГ включает в сеть возбужденным. Перед подключением СГ к сети должны быть выполнены три условия:

1. Должно быть равенство действующих значений ЭДС  $E$  генератора и напряжения  $U$  сети (контролируются вольтметрами).

2. Должно быть равенство частот ЭДС  $E$  генератора и напряжения  $U$  сети:  $f=f_C$  (контролируются частотомерами)

3. Должно быть равенство электрических фаз ЭДС  $E$  генератора и напряжения  $U$  сети:  $\alpha=\alpha_C$  или, как это общепринято, разность фаз  $\Delta\alpha=\alpha-\alpha_C$  должна быть равна нулю (контролируются синхроноскопом).

Перечисленные условия обеспечивают идеальную синхронизацию, при проведении которой уравнивающего тока  $I_{ур}$  в обмотках подключаемого СГ и на шинах сети не возникает. Естественно, точно выполнить перечисленные условия не представляется возможным и, поэтому, возникают уравнивающие токи. Синхронизация считается точной, если по амперметру, включенному в цепь статора, бросок уравнивающего тока не превысил  $(0,7...0,8)I_{ном}$ .

При настройке технических средств синхронизации, необходимо учитывать то, что величина уравнивающего тока наиболее чувствительна к ошибке разности фаз  $\Delta\alpha=\alpha-\alpha_C$ , наименее чувствительна к ошибке разности напряжений  $\Delta U=U-U_C$  и имеет среднюю чувствительность к ошибке разности частот  $\Delta f=f-f_C$ . Поэтому при проведении точной синхронизации сначала подгоняют напряжения (по вольтметрам), затем – частоты (по частотомерам) и на заключительном этапе подгоняют фазы (по стрелочному или ламповому синхроноскопу). Ламповый синхроноскоп представляет набор из трех ламп накаливания, каждая из которых подключена одним концом к фазам СГ, а другим – к одноименным фазам сети. При совпадении фаз СГ и сети лампы не горят. Такой синхроноскоп называют синхроноскопом на погасание.

Способ грубой синхронизации. Схема способа грубой синхронизации приведена на рис. 4.18, б). СГ включает в сеть возбужденным. Этот

способ является только ручным и применяется в тех случаях, когда устройство автоматической синхронизации не работает.

Перед подключением СГ к сети подгоняют по вольтметрам и частотомерам напряжения и частоты сети и СГ. Разность фаз не контролируют, чем и объясняется способ синхронизации как грубый.

Сначала замыкается контактор  $K1$ . СГ подключается к сети через реактор  $Xp$ . Из-за отсутствия подгонки фаз возникнет уравнивающий ток. Реактор как раз и ограничивает уравнивающий ток на допустимом уровне.

После того, как СГ втянется в синхронизм, что контролируется амперметром в цепи статора по спаданию практически до нуля тока в его обмотках, что свидетельствует о совпадении электрических фаз СГ и сети, контактором  $K2$  шунтируют реактор. СГ напрямую включается в сеть.

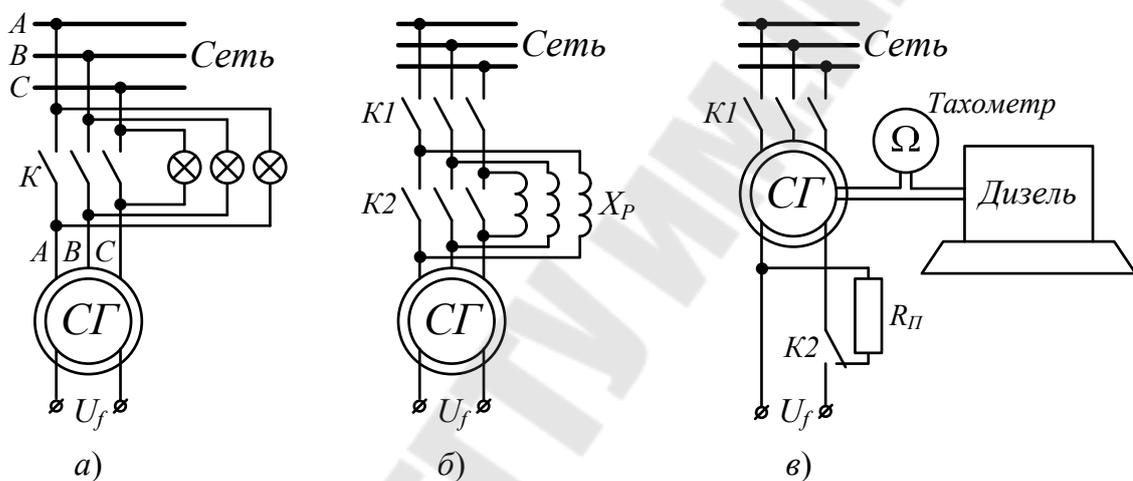


Рисунок 4.18 - Схемы синхронизации СГ на сеть по способу: *а* - точной синхронизации, *б* - грубой синхронизации и *в* - самосинхронизации

Способ самосинхронизации. Схема способа самосинхронизации приведена на рис. 4.18, *б*). СГ включает в сеть невозбужденным, как асинхронный двигатель. Этот способ является только ручным и применяется в тех случаях, когда устройство автоматической синхронизации не работает.

Обмотка возбуждения замкнута на пусковое сопротивление  $R_{п}$ . Контроль напряжения СГ и его частоты в принципе невозможен, так как генератор не возбужден и ЭДС  $E$  нулевая. Перед включением в сеть СГ разгоняют до почти синхронной частоты вращения ( $\omega_0^{\pm 5\%}$ ), что контролируется по тахометру дизеля. Затем контактором  $K1$  подключают СГ к сети. Уравнивающий ток при подключении СГ находится в допустимых пределах  $(0,7...0,8)I_{ном}$ . Невозбужденный СГ для сети представляет асинхронный двигатель.

В статоре подключенного к сети СГ появляются токи, которые создают вращающееся магнитное поле статора. Демпферная обмотка и обмотка возбуждения, замкнутая на сопротивление  $R_{п}$ , создают асинхронный

вращающий момент, который уже электрическим способом в помощь дизелю подводит частоту вращения СГ ближе к синхронной ( $\omega_0^{\pm 2\%}$ ). При спадаении тока статора до некоторого наперед заданного малого значения, обмотку возбуждения переключают контактором  $K2$  на питание от напряжения возбуждения  $U_f$ . СГ втягивается в синхронизм.

### Вопросы и задания

1. Поясните способ точной синхронизации.
2. Поясните способ грубой синхронизации.
3. Поясните способ самосинхронизации.

### 4.12 Принципы регулирования активной и реактивной мощностей СГ

Дизель-генераторный агрегат состоит из СГ и дизеля. СГ вырабатывает электроэнергию заданного уровня напряжения  $U$  и частоты  $f$  (или  $\omega$ ). С помощью напряжения возбуждения  $U_f$  регулируют уровень напряжения  $U$ , а с помощью рейки топливного насоса дизеля регулируется подача топлива  $g$  и, как следствие, регулируется частота вращения дизеля и напряжения СГ.

Эти регулировки использовались на этапах подгонки напряжения и частоты СГ. Генератор, только что подключенный к сети, работает вхолостую, без нагрузки. Далее его нужно нагрузить активной и реактивной мощностями, чтобы он на себя взял часть нагрузки сети.

Для нагружения СГ нужно увеличивать как напряжение возбуждения  $U_f$  так и подачу  $g$  топлива.

Регулирование реактивной мощности. Для нагружения СГ реактивной мощностью необходимо увеличить его реактивный ток  $I_p$ . Достигается это увеличением напряжения возбуждения  $U_f$  и, соответственно, тока возбуждения  $I_f$  (рис. 4.19). При анализе используем упрощенное уравнение (4.13) неявнополюсного СГ. Также будем считать, что СГ подключен к сети бесконечной мощности с  $U_C=const$  и  $f=const$ . Напряжение на выводах СГ равно сетевому, поэтому будем считать  $U=const$ .

Непосредственно после синхронизации при условии совпадений напряжений, частот и электрических фаз СГ и сети вектора  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  будут совпадать (рис. 4.19, а), а ток  $I$  будет равен нулю.

При увеличении напряжения возбуждения  $U_f$  пропорционально увеличится ток возбуждения  $I_f$  и в соответствии с рис.4.8 увеличится ЭДС  $E$  СГ (рис. 4.19, б). Соединяем концы векторов  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  и вектора  $jx_a \dot{I}$ , направленным к концу вектор  $\dot{E}$ , как это должно быть по уравнению (4.13).

Проводим вектор тока  $\dot{I}$  отстающим на  $90^\circ$  от построенного вектора  $jx_a \dot{I}$ . Как следует из построений, вектор тока  $\dot{I}$  отстает от вектора напряжения  $\dot{U}$  на угол  $90^\circ$ . Так как напряжение  $U$  и ток  $I$  СГ являются одновременно напряжением и током нагрузки, то перевозбужденный СГ обеспечивает питанием индуктивную нагрузку, что чаще всего и надо, так как основной нагрузкой СГ являются АД.

При уменьшении напряжения возбуждения  $U_f$  пропорционально уменьшатся ток возбуждения  $I_f$  и ЭДС  $E$  СГ (рис. 4.19, в). Соединяем концы векторов  $\dot{E}$  и  $\dot{U}$  вектором  $jx_a \dot{I}$ , направленным к концу вектор (4.13). Проводим вектор тока  $\dot{I}$  отстающим на  $90^\circ$  от построенного вектора  $\dot{E}$ . Как следует из построений, вектор тока  $\dot{I}$  опережает вектор напряжения  $\dot{U}$  на угол  $90^\circ$ . Недовозбужденный СГ обеспечивает питанием емкостную нагрузку. Так как в сети основной нагрузкой являются АД, то недовозбужденный СГ сам потребляет из сети реактивный ток и реактивную мощность, т.е. нагружать ими другие СГ.

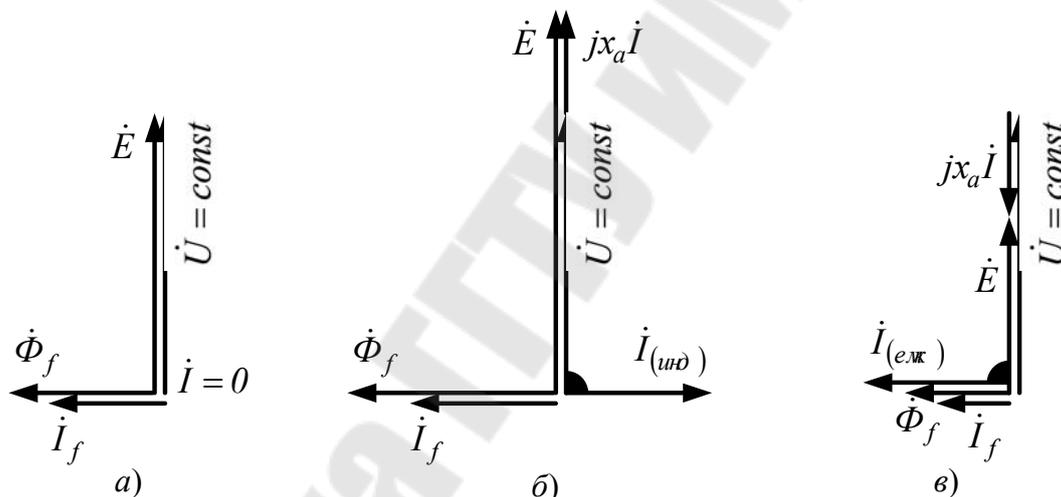


Рисунок 4.19 - Векторные диаграммы СГ при разных токах возбуждения: *а* - непосредственно после синхронизации, *б* - с перевозбуждением, *в* - с недовозбуждением

Выводы по регулированию реактивной мощности СГ:

- 1) реактивную мощность можно регулировать изменением напряжения возбуждения СГ;
- 2) в сети с двигательной нагрузкой нужно применять перевозбужденный СГ.

Регулирование активной мощности. Для нагружения СГ активной мощностью необходимо увеличить его активный ток  $I_a$ . Достигается это увеличением подачи топлива  $g$  в дизель. Напряжение возбуждения  $U_f$  и ЭДС  $E$  СГ неизменны. При анализе будем использовать векторную диа-

грамму (рис. 4.16). Также будем считать, что СГ подключен к сети бесконечной мощности и, поэтому, будем считать  $U=const$  и  $f=const$ .

Из формулы (4.22) активной мощности  $P$  видно, что при постоянных значениях  $U$  и  $E$  мощность  $P$  пропорциональна углу нагрузки  $\theta$ . Значит нужно увеличивать угол  $\theta$ . Для того, чтобы выяснить, как можно увеличить угол  $\theta$ , рассмотрим подробнее векторную диаграмму магнитных потоков  $\Phi_f$  и  $\Phi_\Sigma$  (рис. 4.16). Указанные магнитные потоки вращаются в пространстве против часовой стрелки с одинаковой частотой, однако, причины их вращения разные.

У магнитного потока  $\Phi_f$ , привязанного к обмотке возбуждения, вращение механическое от дизеля. Магнитный поток  $\Phi_\Sigma$ , привязанный к вектору напряжения  $U$  сети с частотой  $f=const$ , имеет электрическое вращение, частота которого стабильна и равна частоте напряжения сети  $f$ .

Если увеличить подачу топлива  $g$  в дизель, то ротор начнет вращаться быстрее, будет ускоренно вращаться вектор магнитного потока  $\Phi_f$  и угол  $\theta$  будет возрастать. Значит, увеличится активная мощность СГ.

Выводы по регулированию активной мощности СГ:

- 1) активную мощность регулируют изменением подачи топлива  $g$  в дизель;
- 2) активная мощность СГ пропорциональна величине подачи топлива  $g$ .

### Вопросы и задания

1. Поясните принцип регулирования реактивной мощности СГ, работающего параллельно с сетью.
2. Поясните принцип регулирования активной мощности СГ, работающего параллельно с сетью.

## 4.13 Работа СГ с регулируемой активной мощностью

Принципиальные вопросы регулирования активной и реактивной мощностей СГ, работающего на шины с постоянным напряжением  $U$  и частотой  $f$ , рассмотрены в предыдущей теме. Здесь рассмотрим подробнее эффекты, возникающие при регулировании активной мощности СГ. Векторная диаграмма для анализа, представленная на рис. 4.20, построена по упрощенному уравнению (4.13) неявнополюсного СГ.

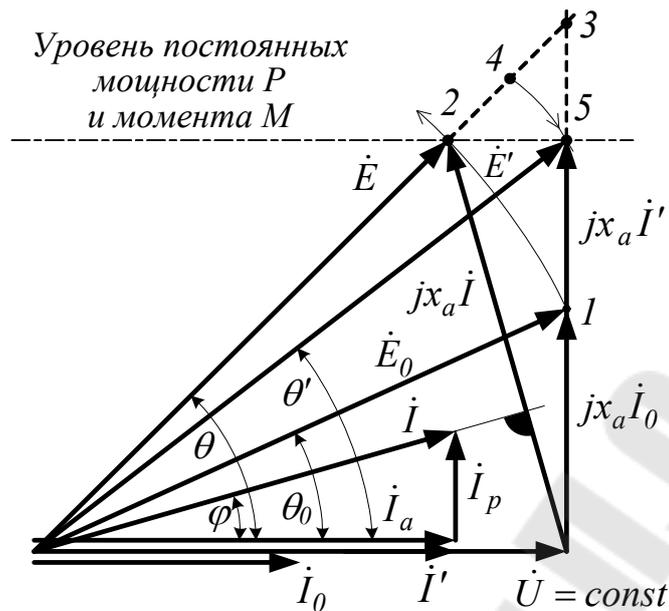


Рисунок 4.20 - Векторная диаграмма СГ при регулировании активной мощности

Пусть в исходном состоянии СГ нагружен чисто активным током  $I_f$ , его ЭДС, равная  $E_0$ , определена построением по уравнению (4.13). Угол нагрузки равен  $\theta_0$ .

Пусть в результате увеличения подачи топлива в дизель вектор  $\dot{E}$ , привязанный к магнитному потоку обмотки возбуждения  $\Phi_f$  повернулся, заняв положение под углом  $\theta$  к вектору  $\dot{U}$  (точка 2), причем будет  $\theta > \theta_0$ . Активная мощность, пропорциональная комплексу  $E \sin \theta$  (см. формулу (4.22)), также увеличится. В соответствии с уравнением (4.13) проводим вектор  $jx_a \dot{I}$  из конца вектора  $\dot{U}$  в конец вектора  $\dot{E}$ . Затем проводим вектор тока  $\dot{I}$  с отставанием на  $90^\circ$  от вектора. Длина вектора прямо пропорциональна длине вектора  $jx_a \dot{I}$ , а длина  $\dot{I}_0$  прямо пропорциональна длине вектора  $jx_a \dot{I}$ . Из построений следует, что  $|jx_a \dot{I}| > |jx_a \dot{I}_0|$  и, поэтому, при увеличении подачи топлива в дизель увеличится ток СГ.

Между векторами  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$  образовался угол  $\varphi$ . Активный ток  $I_a$  вырос в сравнении с током  $I_0$ , но также появился реактивный ток  $I_p$ . Это является побочным эффектом при регулировании активной мощности. Реактивный ток  $I_p$  является током емкостного характера. Такой СГ будет от других генераторов сети потреблять реактивный ток, что недопустимо.

Для подавления реактивного тока  $I_p$  емкостного характера нужно перевозбудить СГ. Можно было бы просто увеличить напряжение возбуждения, так чтобы вектор  $\dot{E}$  удлинился до точки 3, и тогда вектор  $jx_a \dot{I}$  вновь стал бы перпендикулярным вектору  $\dot{U}$  и реактивный ток  $I_p$  стал нулевым.

Однако это неприемлемо потому, что при неизменном угле  $\theta$  активная мощность увеличилась бы сверх той, которую обеспечивает дизель, так как при удлинении вектора  $\dot{E}$  увеличится значение комплекса  $E \sin \theta$ . Нужно увеличить напряжение возбуждения СГ настолько, чтобы вектор  $\dot{E}$  удлинился бы некоторой точки 4. Дизель из-за перегрузки по мощности и, следовательно, перегрузки по моменту, начнет снижение частоты вращения и понижение угла нагрузки  $\theta$  по дуге 4-5 до значения  $\theta'$ . Вектор  $\dot{E}$  займет положение  $\dot{E}'$ . Конечная точка 5 поворота вектора  $\dot{E}'$  должна лежать на одном уровне с точкой 2. Значения комплекса  $E \sin \theta$  в точках 2 и 5 будут одинаковыми, и, значит, работу СГ в точке 5 дизель в состоянии обеспечить при установленном количестве сжигаемого топлива. Вектор  $jx_a \dot{I}$ , проведенный в точку 5, будет перпендикулярен вектору  $\dot{U}$ , а, значит, вектора  $\dot{U}$  и  $\dot{I}$  будут параллельными. Реактивный ток будет нулевым.

### Вопросы и задания

1. Почему при увеличении подачи топлива в дизель увеличивается ток статора СГ?
2. Почему при регулировании активной мощности возникает проблема компенсации реактивной мощности?

### 4.14 Работа СГ с регулируемой реактивной мощностью. U-образная характеристика СГ

Рассмотрим подробнее эффекты, возникающие при регулировании реактивной мощности СГ. Векторная диаграмма для анализа, представленная на рис. 4.21, построена по упрощенному уравнению (4.13) неявнополюсного СГ.

Работа СГ с постоянным моментом в сети бесконечной мощности, в которой напряжение  $U = const$  и  $f = const$ , означает, что в соответствии формулой (4.23) момента СГ, в которой  $U$ ,  $\omega$  и  $x_a$  являются постоянными величинами, должно выполняться тождество

$$E_n \sin \theta_n = const, \quad (4.27)$$

где  $E_n$  и  $\theta_n$  – ЭДС и угол нагрузки СГ при различных токах возбуждения  $I_f$ .

По этому тождеству на рис.4.21 проведена штрихпунктирная линия  $e-e$ , являющаяся геометрическим местом концов векторов  $E_n$ .

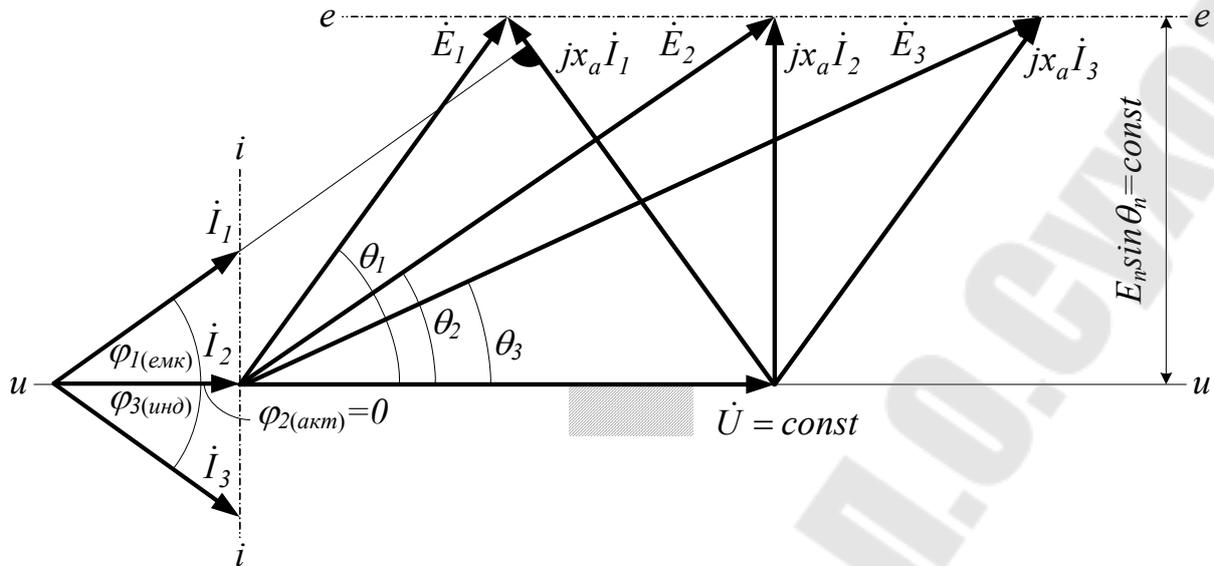


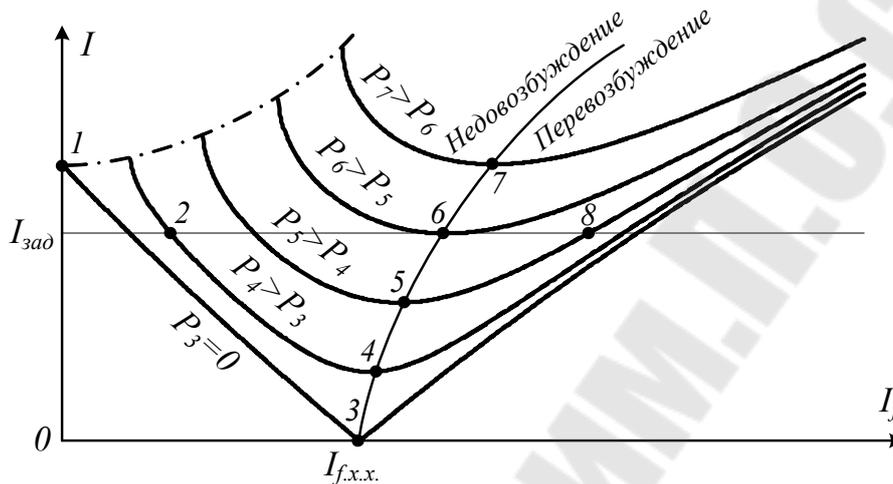
Рисунок 4.21 - Векторные диаграммы СГ при регулировании реактивного тока

На рисунке проведены три вектора ЭДС  $\dot{E}_1, \dot{E}_2$  и  $\dot{E}_3$  из множества возможных. На концах этих векторов и конце вектора  $\dot{U}$  в соответствии с (4.13) построены векторы падений напряжения  $jx_a \dot{I}_1, jx_a \dot{I}_2$  и  $jx_a \dot{I}_3$  на синхронном индуктивном сопротивлении  $x_a$  СГ. Далее, перпендикулярно построенным векторам  $jx_a \dot{I}_1, jx_a \dot{I}_2$  и  $jx_a \dot{I}_3$  проведены вектора токов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$ , которые сгруппированы на чертеже слева и изображены исходящими из одной точки. Ввиду подобия фигур, образованных пучками векторов  $jx_a \dot{I}_1, jx_a \dot{I}_2$  и  $jx_a \dot{I}_3$  и  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$ , концы векторов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  расположены на одно прямой линии, которая обозначена как  $i-i$ . Проекциями векторов  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  на ось  $i-i$  являются их реактивные составляющие, а проекциями на ось  $u-u$  вектора напряжения  $\dot{U}$  являются их активные составляющие. Из построений следует, что активная составляющая любого тока из пучка  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  равна чисто активному току  $I_2$ . Значит, побочного эффекта при регулировании реактивной мощности нет.

Учтем тот факт, что построенные токи  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  и  $\dot{I}_3$  СГ являются одновременно токами, отдаваемые СГ в сеть на шины с  $U=const$ . Из построений видно, что при перевозбуждении (ЭДС  $E_3$ ) СГ отдает в сеть реактивную мощность, которая покрывает ее расходование на индуктивную нагрузку сети, а при недо возбуждении (ЭДС  $E_1$ ) СГ покрывает расходование реактивной энергии на емкостную нагрузку сети. Так как в промышленных сетях электрическая нагрузка является активно-индуктивной, то недо возбужденный СГ никакой емкостной реактивной мощности не вырабатывает, а сам потребляет от других СГ, работающих на сеть, реактивную мощность

индуктивного характера. Естественно, работа СГ недовозбужденным должна быть исключена.

Отображенная на рис. 4.21 зависимость величины тока  $I$  СГ от ЭДС  $E$  и, соответственно, от тока возбуждения  $I_f$  его (рис. 4.8), представленная графически, называется  $U$ -образной характеристикой (рис. 4.22). С помощью  $U$ -образной характеристики можно решить следующие задачи:



Риснок 4.22 -  $U$ -образные характеристики СГ

1) определить величину активного тока при заданной мощности, отдаваемой СГ в сеть (точки на линии 3-4-5-6-7);

2) при заданном токе СГ определить максимальную активную мощность, которую он может отдать в сеть, например, при отмеченном на рис. 4.22 токе  $I_{зад}$  максимальная мощность равна  $P_6$ ;

3) при заданном токе СГ и его активной мощности  $P$  определить значения активной и реактивно составляющих тока, например, при токе  $I_{зад}$  и мощности  $P_6$  весь ток активный, а при мощности  $P_4$  активным будет ток  $I_4$ , определенный для точки 4, а реактивным - ток  $\sqrt{I_{зад}^2 - I_4^2}$  ;

4) при заданной мощности  $P$ , отдаваемой СГ в сеть, определить граничное значение тока возбуждения, разделяющее режимы недовозбуждения и перевозбуждения (линия 3-4-5-6-7).

### Вопросы и задания

1. Почему геометрическими местами концов векторов ЭДС и токов статора являются прямые линии?

2. Почему нет прямой пропорции между токами возбуждения и статора СГ?

3. Какие задачи могут быть решены с использованием  $U$ -образной характеристики?

## 4.15 Параллельная работа соизмеримых по мощности СГ

Функциональная схема электростанции из двух дизель генераторных агрегатов (ДГА) приведена на рис. 4.23. Каждый ДГА оборудован системами регулирования частоты (РЧ), устанавливающих подачу топлива  $g$  в дизель, и регулирования напряжения (РН), устанавливающих напряжение возбуждения  $U_f$ .

На шинах сети уровень напряжения  $U$  и его частота  $f$  постоянные величины, однако, в отличие от сети с бесконечной мощностью, эти параметры поддерживаются системами РЧ и РВ обоих ДГА. Кроме этого:

- системами регулирования подачи топлива (в режиме альтернативного использования РЧ) регулируется распределение активной мощности  $P$  (активной составляющей тока нагрузки  $I_a$ ) нагрузки между параллельно работающими СГ пропорционально их полным мощностям  $S_1$  и  $S_2$ :

$$\begin{cases} P_1 + P_2 = P, \\ \frac{P_1}{P_2} = \frac{S_1}{S_2} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} I_{a1} + I_{a2} = I_a, \\ \frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{S_1}{S_2} \end{cases}. \quad (4.26)$$

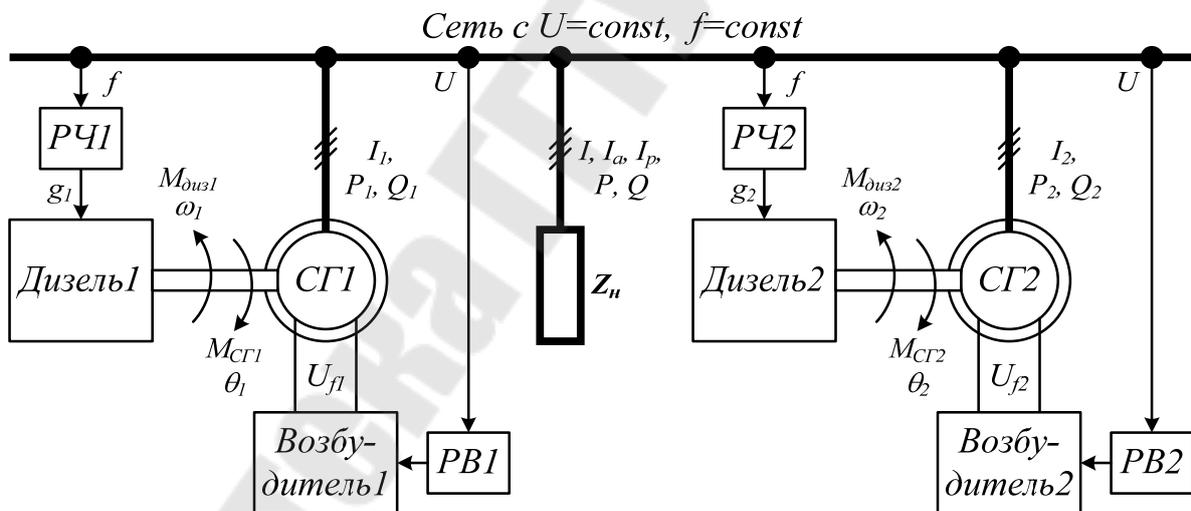


Рисунок 4.23 - Функциональная схема электростанции с двумя ДГА

- системами регулирования напряжения возбуждения (в режиме альтернативного использования РН) регулируется распределение реактивной мощности  $Q$  (реактивной составляющей тока нагрузки  $I_p$ ) нагрузки между параллельно работающими СГ пропорционально их полным мощностям  $S_1$  и  $S_2$ :

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 = Q, \\ \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{S_1}{S_2} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} I_{p1} + I_{p2} = I_p, \\ \frac{I_{p1}}{I_{p2}} = \frac{S_1}{S_2} \end{cases} . \quad (4.27)$$

Величины токов  $I$ ,  $I_a$ ,  $I_p$  и мощностей  $P$ ,  $Q$  нагрузки при постоянстве напряжения  $U$  и частоты  $f$  сети зависят только от комплексного сопротивления нагрузки и абсолютно не зависят распределения токов и мощностей между параллельно работающими СГ.

Рассмотрим электростанцию с двумя абсолютно одинаковыми ДГА и с двумя ДГА, в состав которых входят генераторы разной мощности.

Электростанция с двумя одинаковыми ДГА, у СГ которых  $S_1$  и  $S_2$ .

Так как  $S_1=S_2$ , то в соответствии с (4.26) и (4.27) должно быть:

$$P_1 = P_2, \quad Q_1 = Q_2, \quad I_{a1} = I_{a2}, \quad I_{p1} = I_{p2}, \quad I_1 = I_2,$$

а с учетом равенства фазовых сдвигов  $\varphi=\varphi_1=\varphi_2$  для токов выполняется более сильные равенства, учитывающие фазовые сдвиги:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2}, \quad \dot{I}_{p1} = \dot{I}_{p2}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_2, \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Так как в упрощенных уравнениях неявнополюсных СГ (4.13) слагаемые и  $jx_a \dot{I}$  одинаковые, то должны быть одинаковыми и ЭДС  $\dot{E}$  обоих СГ и углы нагрузки –  $\theta_1=\theta_2$ .

Векторная диаграмма для случая двух одинаковых ДГА, обладающая отмеченными особенностями токов, напряжений и углов, приведена на рис. 4.24, а.

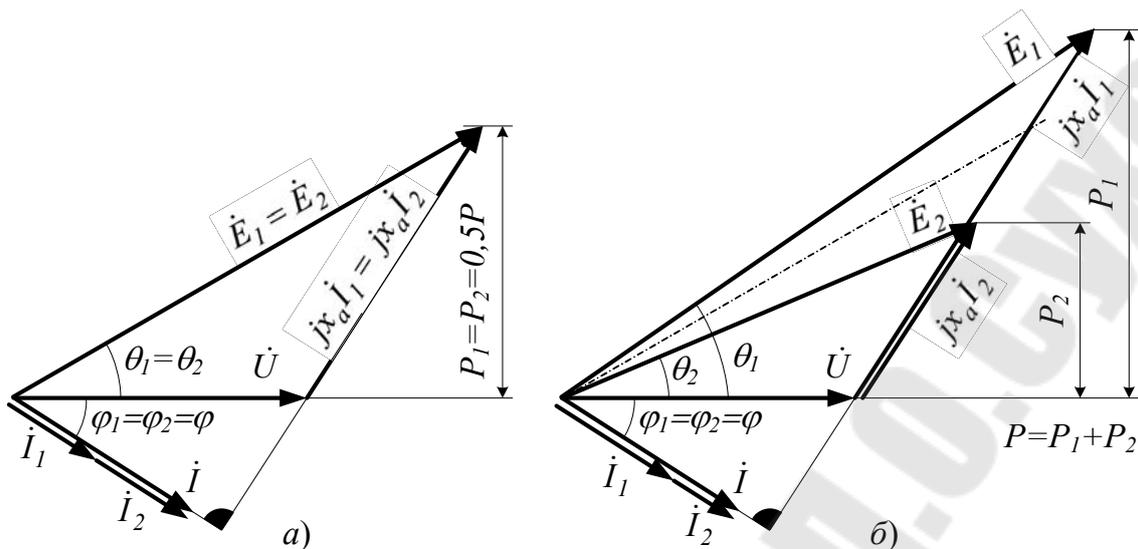


Рисунок 4.24 - Векторная диаграмма параллельно работающих СГ одинаковых (а) и разных мощностей (б)

Электростанция с двумя СГ с неравными мощностями  $S_1 \neq S_2$ . Пусть  $S_1 > S_2$ . Тогда в соответствии с (4.26) и (4.27) должно быть:

$$P_1 > P_2, \quad Q_1 > Q_2, \quad I_{a1} > I_{a2}, \quad I_{p1} > I_{p2}, \quad I_1 > I_2.$$

Примем такое регулирование подачи  $g$  и напряжения возбуждения  $U_f$  СГ, чтобы для фазовых сдвигов  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  выполнялось их равенство -  $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ . Тогда вектора токов  $\dot{I}$ ,  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  будут параллельны. При параллельных токах  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  вектора  $jx_a \dot{I}_1$  и  $jx_a \dot{I}_2$  будут также параллельными, но вектор  $jx_a \dot{I}_1$  будет длиннее вектора  $jx_a \dot{I}_2$ . Тогда при тупом угле между вектором напряжения  $\dot{U}$  и векторами  $jx_a \dot{I}_1$  и  $jx_a \dot{I}_2$  в соответствии с упрощенным уравнением неявнополюсного СГ (4.13) их сумма, равная  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  будет такова, что модуль  $\dot{E}_1$  будет больше модуля  $\dot{E}_2$  и, следовательно, будет  $E_1 > E_2$  (рис. 4.24, б). Также будут разными углы нагрузки  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Значит СГ1 возьмет на себя большую активную мощность  $P_1$ , чем активная мощность  $P_2$  СГ2, но их сумма будет равна активной мощности  $P$  нагрузки. Так как фазовые сдвиги  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  обоих СГ совпадают, то в соответствии с формулой  $Q = P \cdot \operatorname{tg} \varphi$ , связывающей активную и реактивную мощности, реактивная мощность  $Q_1$  первого СГ будет больше реактивной мощности  $Q_2$  второго СГ, но сумма этих мощностей будет равна реактивной мощности  $Q$  нагрузки.

Таким образом, при изображенной на рис. 4.24, б векторной диаграмме будут выполнены условия (4.26) и (4.27). На языке векторных диа-

грамм, равномерное распределение мощностей между параллельно работающими СГ достигается благодаря тому, что:

- угол нагрузки  $\theta_1$  первого СГ увеличен, а угол нагрузки  $\theta_2$  второго СГ уменьшен (на рис. 4.24, б штрихпунктиром показано направление векторов  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$  при одинаковых СГ);

- длина вектора ЭДС  $E_1$  увеличена, а вектор ЭДС  $E_2$  стал короче.

На уровне управляющих сигналов подачу  $g_1$  топлива первого дизеля и напряжение возбуждения  $U_{f1}$  первого СГ нужно увеличить при одновременном уменьшении подачи  $g_2$  топлива второго дизеля и напряжения возбуждения  $U_{f2}$  второго СГ.

В одновременном изменении величин подачи топлива  $g$  и напряжения возбуждения  $U_f$  обоих ДГА и заключается особенность параллельной работы генераторов соизмеримой мощности при условиях постоянства общего напряжения  $U$  и пропорционального распределения между СГ мощностей  $P$  и  $Q$ .

### Вопросы и задания

1. Поясните функциональную схему параллельной работы двух СГ соизмеримой мощности. Какие задачи ставятся перед РЧ и РН обоих СГ?

2. Поясните векторную диаграмму и процессы, происходящие в параллельно работающих СГ одинаковой мощности.

3. Поясните векторную диаграмму и процессы, происходящие в параллельно работающих СГ разной мощности.

### 4.16 Системы возбуждения СГ

Устройство, создающее напряжение возбуждения  $U_f$  СГ, называется возбудителем. По способу питания обмотки возбуждения СГ подразделяются на генераторы со щеточно-коллекторным узлом (рис.4.1), через который на ОВ подводится напряжение возбуждения  $U_f$  и на бесщеточные, у которого концы ОВ не выведены на контактные кольца.

#### *Статический возбудитель СГ*

Статический возбудитель представляет собой управляемый трехфазный выпрямитель (вентильный комплект ВК) на тиристорах (рис. 4.25, а). С помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ) задают угол открытия тиристоров ВК, в результате чего изменяется его выходное напряжение  $U_f$ .

Достоинства:

- практически неограниченный срок службы и малые расходы на его обслуживание;
- высокое быстродействие, оцениваемое задержкой времени между моментом изменения управляющего сигнала  $U_y$  и моментом достижения установившегося напряжения  $U_f$ .

Недостатки:

- возбудитель не применим для автономно работающего СГ, так как в этом случае просто отсутствует напряжение сети  $U$ ;
- возбудитель для сети является мощным источником помех, так как тиристорный выпрямитель потребляет из сети по фазам импульсные токи.

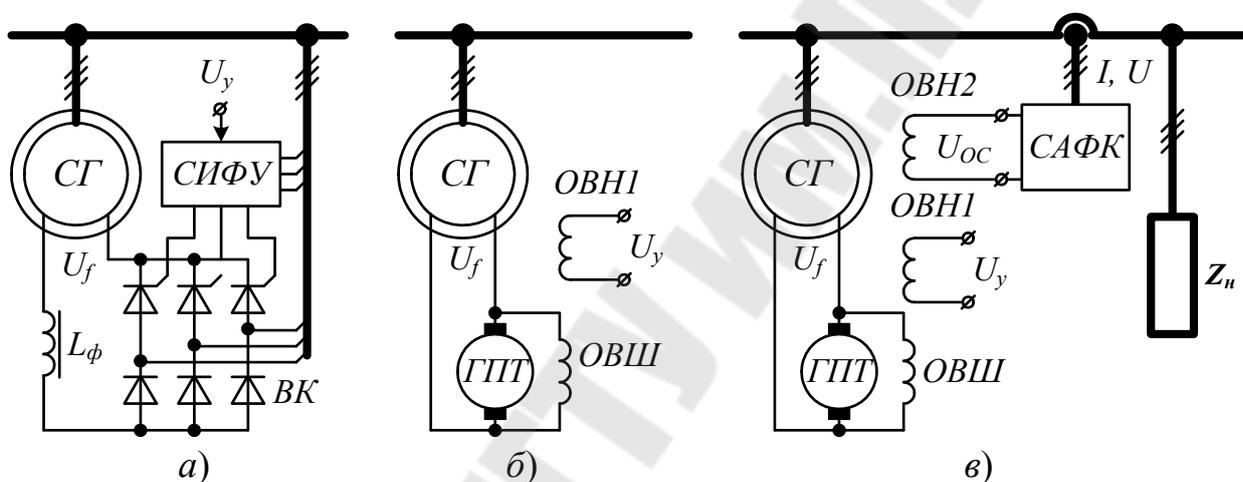


Рисунок 4.25 - Системы возбуждения щеточных СГ

### Электромашинный возбудитель СГ

Электромашинный возбудитель представляет собой генератор постоянного тока, находящийся на одном валу с СГ (рис. 4.25, б). ГПТ содержит параллельную (шунтовую) обмотку возбуждения ОВШ и одну независимую ОВН1 обмотку. ОВШ обеспечивает самовозбуждение ГПТ, в результате чего на его выходе устанавливается напряжение  $U_{f.x.x}$ , обеспечивающее номинальное напряжение на выходе ненагруженного СГ (на холостом ходу). На ОВН1 подается управляющее напряжение  $U_y$ , которым регулируется напряжение  $U_f$  при работе СГ под нагрузкой.

Достоинства:

- автономность, так как для работы возбудителя не нужен сторонний источник напряжения.
- ГПТ не засоряет сеть помехами, так как между ним и сетью нет электрического контакта.

Недостатки:

- большие расходы на обслуживание ГПТ;
- низкое быстродействие из-за наличия инерционной независимой ОВГ.

### ***Электромашинный возбудитель СГ на базе трехобмоточного ГПТ***

Электромашинный возбудитель представляет собой генератор постоянного тока, находящийся на одном валу с СГ (рис. 4.25, в). ГПТ содержит шунтовую обмотку возбуждения ОВШ и две независимых – ОВН1 и ОВН2. ОВШ обеспечивает самовозбуждение ГПТ. На ОВН1 подается управляющее напряжение  $U_y$ , которым регулируется напряжение  $U_f$  при работе СГ под нагрузкой. Вторая обмотка возбуждения (ОВН2) является обмоткой обратной связи, включенной по магнитному потоку согласно с ОВН1. Питание ОВН2 получает от схемы амплитудно-фазового компаундирования (САФК). САФК представляет собой схему на пассивных элементах (трансформаторах, катушках, конденсатора и резисторах), которая вырабатывает сигнал  $U_{OC}$  пропорциональный величине тока нагрузки СГ и учитывает сдвиг по фазе  $\varphi$  между током и напряжением в нагрузке.

Достоинства:

- автономность, так как для работы возбудителя не нужен сторонний источник напряжения.
- обеспечивает приемлемую стабильность напряжения  $U$  СГ при изменениях тока нагрузки СГ и сдвига по фазе  $\varphi$  между током и напряжением в ней.

Недостатки:

- большие расходы на обслуживание ГПТ;
- низкое быстродействие из-за наличия инерционных независимых ОВГ.

### ***Возбудитель бесщеточного СГ***

Конструктивно на одном валу с СГ находятся возбудитель (В) и трехфазный выпрямитель (ВК) на диодах (рис. 4.26).

Возбудитель (В) представляет собой обращенный синхронный генератор малой мощности (2...3% мощности СГ), у которого обмотка возбуждения ОВ находится на статоре, а трехфазная якорная обмотка находится на роторе. На том же роторе находится ОВ СГ и, поэтому, обмотки возбуждения возбудителя и СГ взаимно неподвижны, и между ними установлено глухое электрическое соединение, без использования щеток. Якорная обмотка возбудителя соединена в звезду с нулевым проводом и к ней под-

ключен трехфазный выпрямитель с нулевым проводом. Этот выпрямитель расположен на валу и вращается вместе с ним.

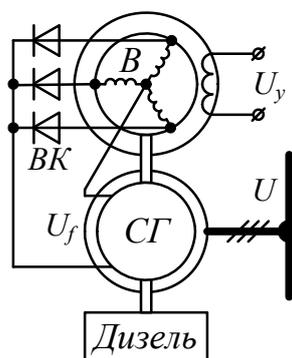


Рисунок 4.26 – Бесщеточная система возбуждения СГ

Достоинства:

- практически неограниченный срок службы и малые расходы на его обслуживание;
- возбудитель не засоряет сеть помехами, так как выпрямитель непосредственно не выходит на сеть.

Недостатки:

- для работы возбудителя используется напряжение сети  $U$ , которое может изменяться при изменении нагрузки СГ и которого просто нет в случае, если генератор автономный, а не работающий на сеть в параллель с другими СГ;
- низкое быстродействие из-за наличия инерционной ОВ возбудителя.

### Вопросы и задания

1. Поясните схему статического возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
2. Поясните схему электромашинного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
3. Поясните схему электромашинного многообмоточного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.
4. Поясните схему бесщеточного возбудителя и охарактеризуйте его достоинства и недостатки.

### 4.17 Устройство и принцип действия синхронного двигателя

Конструктивно синхронный двигатель (СД) ничем не отличается от СГ (рис. 4.1, а). Есть только отличия в назначении его обмоток.

На обмотку статора подается сетевое напряжение. Назначением статора является создание им вращающегося магнитного поля протекающими по обмоткам токами. Это поле необходимо для создания вращающего момента СД и оно не считается полем, искажающим поле обмотки возбуждения, как это видится в СГ. Поэтому эту обмотку в СД не принято называть якорем.

ОВ так же запитывается от возбуждателя, в ней создается ток  $I_f$ . Взаимодействием проводников ОВ, обтекаемых током, с вращающимся магнитным полем статора создаёт синхронный вращающий момент  $M_c$  СД.

Назначение короткозамкнутой демпферной обмотки типа «беличье колесо» также в корне меняется, и она используется в качестве пусковой обмотки для создания асинхронного вращающего момента  $M_a$  на этапе разгона СД от подачи напряжения питания на статор. Однако из-за того, что пусковая обмотка СД всегда выполняется не глубокопазной вследствие малого места, выделенного для ее размещения в пазах полюсных наконечников ОВ (рис. 4.1, а), то пусковые характеристики такой обмотки неудовлетворительные. Главное в том, что пусковая обмотка позволяет получить пусковой момент СД на уровне всего  $(0,4...0,5)M_{ном}$ .

На этапе разгона ОВ замыкается на активное сопротивление, по ней протекают токи, и она также создаёт асинхронный вращающий момент СД. Совместным действием пусковой обмотки и ОВ удастся поднять пусковой момент СД до  $(0,6...0,7) M_{ном}$ . Значит, СД должны запускаться максимально разгруженными, что и указывается в паспортных данных СД.

Также из-за того, что стержни пусковой обмотки имеют малое сечение (в сравнении с сечением стержней короткозамкнутой обмотки АД), то во время разгона СД они разогреваются до  $300^\circ$ . Поэтому СД не допускают многократных пусков подряд, что также указывается в паспортных данных СД.

Для СД рассчитываются и используется две механические характеристики:

1) МХ синхронного момента, формула которой точно такая же, как и у СГ, для неявнополюсного и явнополюсного СД, соответственно:

$$M_{c.н} = \frac{3EU}{\omega x_a} \sin \theta, \quad M_{c.я} = \frac{3EU}{\omega x_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta; \quad (4.28)$$

2) МХ асинхронного момента

$$M_a = \frac{2M''_{d.к}}{\frac{s}{s''_{d.к}} + \frac{s''_{d.к}}{s}} + \frac{2M''_{q.к}}{\frac{s}{s''_{q.к}} + \frac{s''_{q.к}}{s}} + \frac{2M'_{d.к}}{\frac{s}{s'_{d.к}(n+1)} + \frac{s'_{d.к}(n+1)}{s}}. \quad (4.29)$$

Асинхронный момент содержит три составляющие;

1. Вращающий момент  $M_d''$ , созданный взаимодействием обтекаемой током пусковой обмоткой, расположенной по оси  $d$ , с полем статора (первое слагаемое в формуле (4.29)). Значения критического момента  $M_{d.к}''$  и критического скольжения  $s_{d.к}''$  определяются сопротивлениями пусковой обмотки по оси  $d$  с учетом влияния индуктивно-связанных с нею обмоткой статора и ОВ.

2. Вращающий момент  $M_q''$ , созданный взаимодействием обтекаемой током пусковой обмоткой, расположенной по оси  $q$ , с полем статора (второе слагаемое в формуле (4.29)). Значения критического момента  $M_{d.к}''$  и критического скольжения  $s_{d.к}''$  определяются сопротивлениями пусковой обмотки по оси  $q$  с учетом влияния индуктивно связанной с нею обмоткой статора.

3. Вращающий момент  $M_d'$ , созданный взаимодействием обтекаемой током обмоткой возбуждения, расположенной по оси  $d$ , с полем статора (третье слагаемое в формуле (4.30)). Значения критического момента  $M_{d.к}'$  и критического скольжения  $s_{d.к}'$  определяются сопротивлениями ОВ с учетом влияния индуктивно связанной с нею обмоткой статора. В этом слагаемом также учтена кратность пускового сопротивления, на которое замыкается ОВ ( $n=5...10$ ).

Графики асинхронного момента и его составляющих приведены на рис. 4.27 и рис. 4.28. В диапазоне подсинхронного скольжения  $s_{nc}$  на ОВ подается напряжение возбуждения и СД втягивается в синхронизм. Подсинхронное скольжение выбирается равным  $0,03...0,05$ .

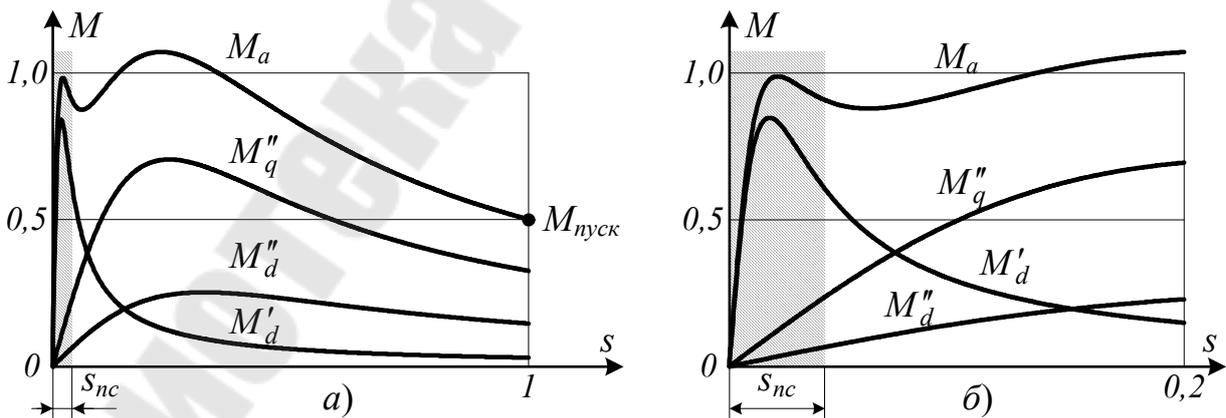


Рисунок 4.27 - Асинхронный момент СГ при короткозамкнутой ОВ в диапазоне скольжений от 0 до 1 (а) и от 0 до 0,2 (б)

Влияние пускового сопротивления на механическую характеристику неоднозначно.

При разгоне СД с замкнутой накоротко ОВ пусковой момент составляет всего  $0,5M_{ном}$ , а при замыкании ОВ на 8-кратное пусковое сопротивление пусковой момент увеличивается до  $0,72M_{ном}$ . Значит на пусковые свойства СД влияние пускового сопротивления положительное.

На подсинхронной частоте вращения СД подключение пускового сопротивления дает отрицательный результат – асинхронный момент снижается практически вдвое. СД с подключенным пусковым сопротивлением может просто не достичь малого подсинхронного скольжения и СД и синхронизация окажется невозможной.

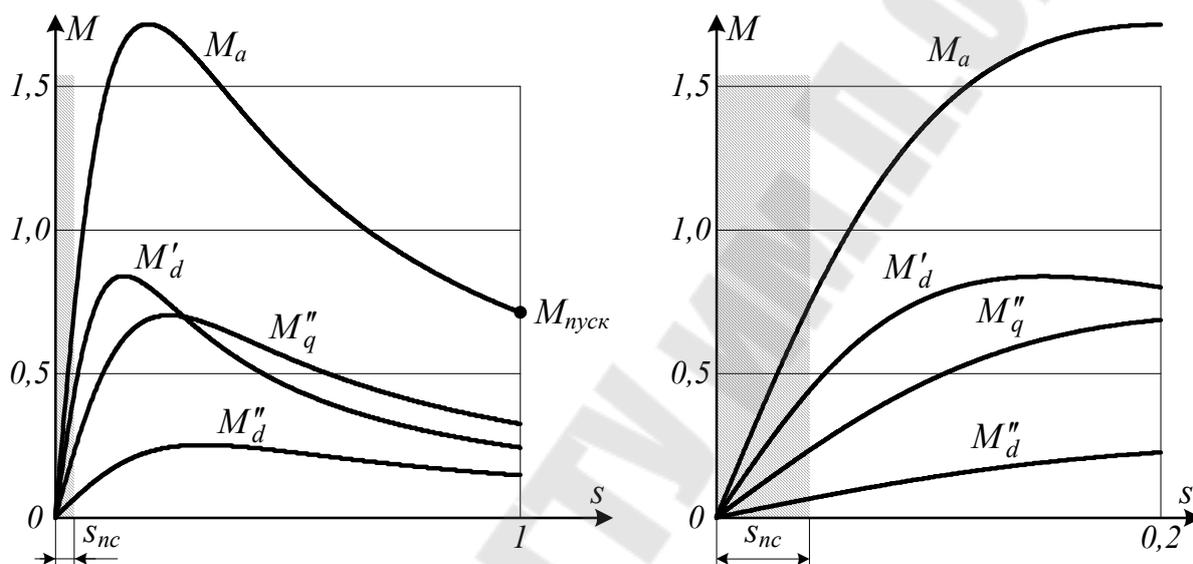


Рисунок 4.28 - Асинхронный момент СГ при замкнутой ОВ на  $R_{II}=8R_f$  в диапазоне скольжений от 0 до 1 (а) и от 0 до 0,2 (б)

### Вопросы и задания

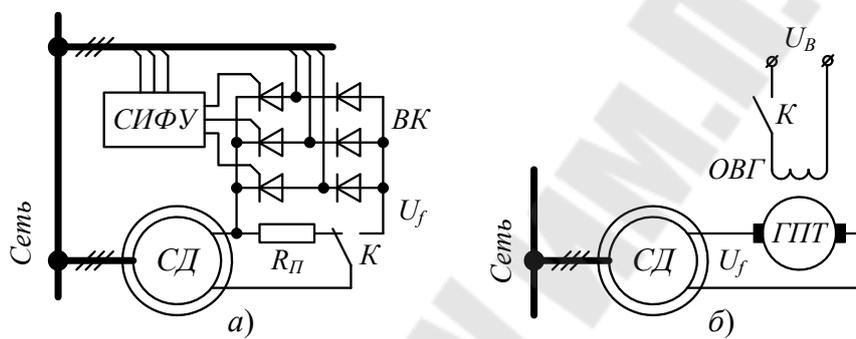
1. Поясните способ использования обмоток СД по назначению.
2. Какие механические характеристики СД рассчитываются и используются для управления СД?
3. Как влияет величина пускового сопротивления в цепи ОВ на пусковой и подсинхронный моменты?

### 4.18 Пуск в ход СД. Рабочие характеристики СД

Так же как и у СГ возбудители СД могут быть статическими и электромашинными. Схемы пуска СД приведены на рис. 4.29.

В схеме пуска со статическим возбудителем (рис. 4.29, а) ОВ СД сначала замкнута на пусковое сопротивление  $R_{II}$ , что обеспечивает максимально быстрый разгон СД с повышенным пусковым моментом (рис. 4.30 б).

Во время быстрого разгона выделяется меньше тепла в пусковой короткозамкнутой обмотке. При достижении подсинхронного скольжения контактором К отключается пусковое сопротивление  $R_{II}$  от ОВ и на нее подается напряжение возбуждения  $U_f$ . СД втягивается в синхронизм, переходя с асинхронной механической характеристики (4.29) на синхронную (4.28). Так как при разгоне СД с пусковым сопротивлением  $R_{II}$  асинхронный момент значительно понижается при подходе к подсинхронному скольжению, и переключение ОВ на питание от возбудителя всегда происходит при большом скольжении (ближе к  $0,05$ ), то при втягивании в синхронизм на ОВ СД подается повышенное (форсированное, больше номинального) напряжение возбуждения.



Риснок 4.29 - Схемы пуска синхронного двигателя

В схеме пуска с электромашинным возбудителем (рис. 4.29, б) ОВ СД наглухо замкнута на якорь ГПТ, который вначале не возбужден – контактор К в цепи ОВ возбудителя разомкнут. Пусковой момент при таком разгоне минимальный (рис. 4.27). Разгон протекает долго, за время разгона пусковая короткозамкнутая обмотка СД успевает сильно разогреться. Однако в районе подсинхронного скольжения асинхронный момент СД высокий, что позволяет легко достичь малого подсинхронного скольжения (около  $0,02...0,03$ ). Затем замыкается контактор К в цепи ОВ генератора постоянного тока, на его выходе устанавливается напряжение, которое подается на ОВ СД. СД втягивается в синхронизм.

К рабочим характеристикам СД относятся МХ асинхронного (4.29), синхронного (4.28) моментов и регулировочные характеристики реактивного тока (реактивной мощности). МХ СД были рассмотрены в предыдущей теме. Для расчета регулировочных характеристик используем упрощенное уравнение неявнополюсного СД:

$$\dot{U} = \dot{E} + jx_a \dot{I}, \quad (4.30)$$

где  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}$  – напряжение сети и ЭДС, наведенная полем обмотки возбуждения;  
 $jx_a \dot{I}$  – падение напряжения на обмотке статора СД.

Векторные диаграммы СД, построенные по (4.30) при различных значениях ЭДС  $E$ , пропорциональных току возбуждения  $I_f$ , приведены на рис. 4.30.

Из построений видно, что при перевозбуждении (самая большая ЭДС  $E_3$ ) СД потребляет из сети активно-емкостной ток  $I_3$ . Значит, перевозбужденный СД компенсирует в сети реактивный ток индуктивного характера, позволяет снизить выработку синхронными генераторами индуктивного тока и в таком случае в сети электроснабжения можно не устанавливать косинусные конденсаторы. Вращающийся ротор, на котором расположена обмотка возбуждения, создающая поле  $\Phi_f$ , постоянно догоняет вращающееся магнитное поле  $\Phi_\Sigma$  статора.

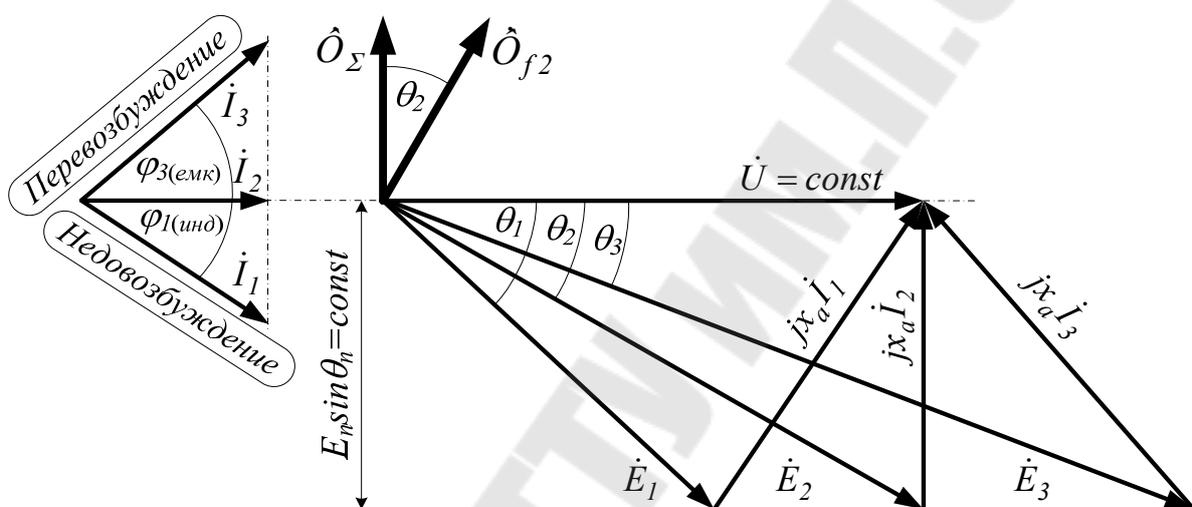


Рисунок 4.30 - Векторные диаграммы СД с регулируемым возбуждением

Достоинства СД:

- обеспечивают постоянство частоты вращения независимо от величины механической нагрузки на валу;
- его можно использовать по альтернативному назначению - компенсации в сети реактивной мощности индуктивного характера;
- менее чем АД чувствительны к понижениям напряжения  $U$  в сети, так как синхронный момент СД зависит от  $U$ , а у АД зависит от  $U^2$ .

Недостатки СД:

- сложный алгоритм, схема пуска и высокая стоимость схемы пуска, из-за чего применение СД экономически оправдывается при их мощности свыше  $100 \text{ кВт}$  и, как правило, высоковольтных ( $6$  и  $10 \text{ кВ}$ );
- в случае выпадения СД из синхронизма возникает опасный для сети аварийный режим с токами, достигающими двойных токов короткого замыкания.

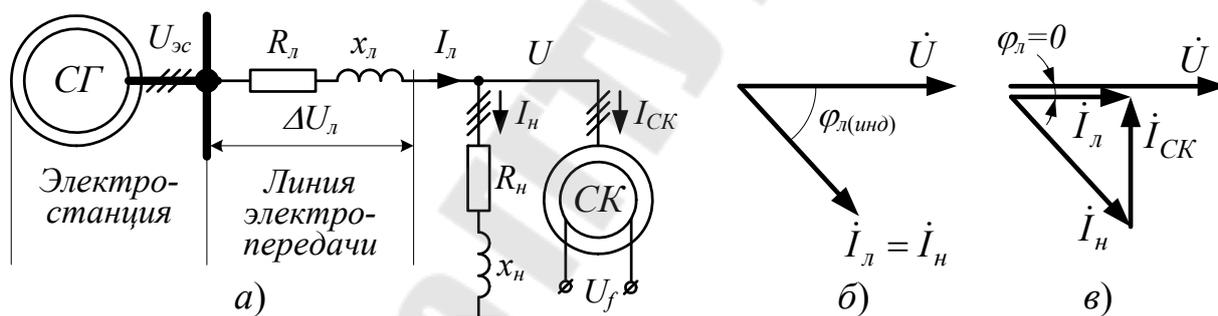
## Вопросы и задания

1. Поясните схемы пуска СД, отметив их достоинства и недостатки.
2. Как СД можно использовать для компенсации реактивной мощности индуктивного характера в сети?

### 4.19 Синхронный компенсатор. Синхронно-реактивный двигатель

Синхронным компенсатором (СК) называется СД, используемый по альтернативному назначению – компенсации реактивной мощности в сети. Этот вариант использования СД отразился на конструкции СД, а именно, у СК вал ротора не выводится наружу, он исполняется небольшого сечения, подшипники и корпус - облегченные.

СК вводится в работу так же, как и СД (рис.4.29). Регулирование емкостного тока достигается в режиме перевозбуждения СК (рис. 4.30). Положительные эффекты при использовании на предприятии СК иллюстрируются рис. 4.31.



Риснок 4.31 - Схема включения в сеть синхронного компенсатора

В сети без СК ток  $I_l$  в линии электропередачи совпадает с током нагрузки  $I_n$  и отстает от напряжения  $U$  на угол  $\varphi_{l(инд)}$  (рис. 4.31, б). На сопротивлении линии  $R_l + jx_l$  теряется напряжение величиной  $\Delta U_l = I_l \sqrt{R_l^2 + x_l^2} = I_n \sqrt{R_l^2 + x_l^2}$ , из-за чего напряжение  $U$  на нагрузке меньше напряжения  $U_{эс}$  на электростанции. Кроме того, в активном сопротивлении  $R_l$  линии теряется мощность

В сети с СК ток  $I_l$  в линии электропередачи равен только активной составляющей тока нагрузки  $I_{na} = I_n \cos \varphi_n$  (рис. 4.31, в). На сопротивлении линии  $R_l + jx_l$  теряется напряжение  $\Delta U_l = I_n \cos \varphi_n \sqrt{R_l^2 + x_l^2}$ , которое меньше, чем в схеме без СК и, значит, напряжение на нагрузке  $U$  напряже-

ния выше. Кроме того, в сопротивлении  $R_l$  линии уменьшается мощность потерь  $R_l I_l^2 \cos^2 \varphi_n$ .

Использование СК вместо косинусных конденсаторов для компенсации реактивной мощности выгоднее по следующим причинам:

1. СК занимают для установки меньшие площади здания.
2. СК нечувствителен к помехам в сети, в то время как косинусные конденсаторы в сети с помехами могут не только выйти из строя, но могут и взорваться.

3. С помощью СК можно путем регулирования напряжения возбуждения  $U_f$  просто изменять ток компенсации  $I_{СК}$ , что необходимо в случае изменения величины реактивного тока  $I_{нр} = I_n \sin \varphi_n$  нагрузки.

Синхронно реактивный двигатель (СРД) представляет трехфазную машину без обмотки возбуждения, у которого вращающий момент является синхронно-реактивным (второе слагаемое формулы (4.28) синхронного момента СД). Устройство СРД приведено на рис. 4.32, а.

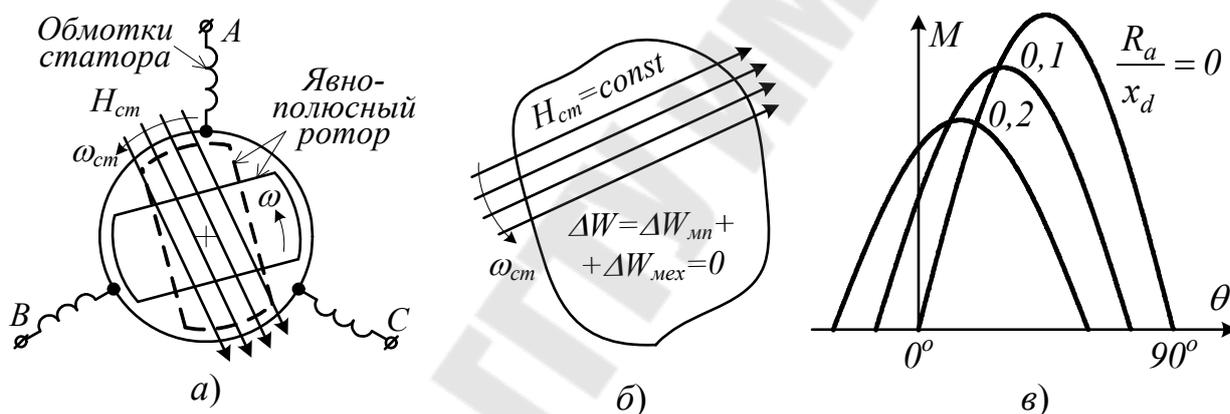


Рисунок 4.32 - Синхронно-реактивный двигатель: устройство (а), к выводу формулы вращающего момента (б) и угловая характеристика (в)

Токами обмоток статора создается вращающееся магнитное поле с параметрами:

- напряженность (намагничивающая сила)  $H_{cm}$  магнитного поля статора;
- частота вращения  $\omega_{cm}$  магнитного поля статора.

Ротор с частотой  $\omega$  вращается в сторону, что и поле статора, причем  $\omega_{cm} > \omega$ . При вращении поля и ротора изменяется ориентация оси ротора относительно оси поля статора, что влияет на величину индуктивности  $L_{cm}$  обмоток статора. Если ось ротора перпендикулярна к оси поля (близкое к указанной ориентации занимает ротор, изображенный сплошной линией), то на пути потока существует большой воздушный зазор и, следовательно, индуктивность статора минимальна –  $L_{cm.min}$ . Если ось ротора параллельна

оси поля (близкое к указанной ориентации занимает ротор, изображенный пунктирной линией), то на пути потока существует малый воздушный зазор и, следовательно, индуктивность статора максимальна –  $L_{cm.max}$ . Налицо периодические изменения индуктивности. Если ось ротора перпендикулярна к оси поля (близкое к указанной ориентации занимает ротор, изображенный сплошной линией), то на пути потока существует большой воздушный зазор и, следовательно, индуктивность статора минимальна –  $L_{cm}$  при вращении ротора.

Установленное изменение индуктивности служит причиной появления вращающего момента СРД. Рассмотрим СРД как систему, к которой извне (из сети) подводится энергия и носителем энергии является электрический ток  $I$  статора (рис. 4.32, б). Используем определения энергии магнитного поля катушки в виде

$$W_{mn} = \frac{L_{cm} I^2}{2},$$

где ток  $I$  пропорционален напряженности  $H_{cm}$  обобщенного магнитного поля статора, полученного суммирование напряженностей трех катушек статора, а механической энергии вращательного движения в виде  $W_{mex} = M \cdot \alpha$  ( $\alpha$  – угол поворота вала СРД).

Так как  $H_{cm}$  имеет постоянную величину (поле только вращается), то нужно считать ток обобщенным током статора и, значит, постоянной величиной.

Полая энергия СРД равна сумме энергий  $W_{mex}$  и  $W_{mn}$ . Так как СРД по отношению к сети является автономной замкнутой системой, к которой нет другого, чем из сети, подвода энергии и потребляемый из сети обобщенный ток постоянен, то изменения полной энергии СРД в любой момент времени нулевое:

$$\begin{aligned} \frac{d(W_{mex} + W_{mn})}{dt} &= \frac{d(M\alpha)}{dt} + \frac{d\left(\frac{L_{cm} I^2}{2}\right)}{dt} = M \frac{d\alpha}{dt} + \left(\frac{I^2}{2}\right) \frac{dL_{cm}}{dt} = \\ &= M \cdot \omega + \left(\frac{I^2}{2}\right) \frac{dL_{cm}}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad M = -\left(\frac{I^2}{2\omega}\right) \frac{dL_{cm}}{dt}. \end{aligned}$$

Из полученной формулы видно, что вращающий момент СРД пропорционален скорости изменения индуктивности статора  $L_{cm}$ .

Формула угловой характеристики СРД, полученная без учета активного сопротивления обмотки  $R_a$  статора имеет такой же вид как и формула синхронно-реактивного момента у явнополюсного СД (рис. 4.32, в):

$$M_{\text{СРД}} = \frac{3U^2}{2\omega} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

При учете активного сопротивления обмотки  $R_a$  статора графики механических характеристик сдвигаются влево (рис. 4.32, в).

Достоинства СРД:

- обеспечивает постоянство частоты вращения независимо от нагрузки;

- дешевизна, надежность и большой срок службы.

Недостатки СД:

- малый коэффициент мощности –  $\cos\varphi < 0,5$ ;

- низкий КПД -  $\eta < 0,7$ .

### Вопросы и задания

1. Поясните устройство и принцип действия синхронного компенсатора. Какие показатели электроснабжения улучшает синхронный компенсатор?

2. Поясните устройство и принцип действия синхронно-реактивного двигателя.

### 4.20 Вентильные двигатели

Вентильным двигателем (ВД) называется СД, отличающийся от последнего способом питания его статора. ВД получает питание от преобразователя частоты с учетом положения ОВ относительно поля статора (рис. 4.33).

Период изменения питающего ВД напряжения состоит из шести циклов: Ц1, Ц2, Ц3, Ц4, Ц5 и Ц6.

В цикле Ц1 замкнута пара ключей К5 и К2. Ток, протекающий по обмоткам фаз В и С статора ВД создает неподвижное в пространстве поле статора  $\Phi_{\text{см},0}$  с направлением  $0^\circ$ . В цикле Ц2 замкнута пара ключей К5 и К4. Ток, протекающий по обмоткам фаз В и А статора ВД создает неподвижное в пространстве поле статора  $\Phi_{\text{см},60}$  с направлением  $60^\circ$ . В цикле Ц3 замкнута пара ключей К1 и К4. Ток, протекающий по обмоткам фаз С и А статора ВД создает неподвижное в пространстве поле статора  $\Phi_{\text{см},120}$  с направлением  $120^\circ$ . Аналогичными переключениями создаются еще три поля  $\Phi_{\text{см},180}$ ,  $\Phi_{\text{см},240}$  и  $\Phi_{\text{см},300}$  с направлениями  $180^\circ$ ,  $240^\circ$  и  $300^\circ$ . Таким образом, замыканиями ключей К1...К6 в статоре создается магнитное поле с шестью фиксированными (неподвижными) направлениями в пространстве и скачкообразных переходов между фиксированными направлениями. Такое пе-

ремещение поля статора в пространстве является дискретным вращением против часовой стрелки со средней частотой  $\omega_{cm}$ .

Пусть в статоре создано поле  $\Phi_{cm,0}$ , с полюсом  $N_{cm}$  слева и полюсом  $S_{cm}$  справа. Ротор располагался так, как показано на рис. 4.33, а. Изобразим обмотку возбуждения с полем в виде одного витка с током, причем направление тока в витке выбираем таким, полюс  $N_p$  был слева, а полюс  $S_p$  - справа. На отображенный контур ОВ с током, помещенный в магнитное поле  $\Phi_{cm,0}$  статора, действует пара механических сил  $F$ . Плечо этих сил обозначено как  $h$ . Вращающий момент, действующий на контур ОВ равен  $M=F \cdot h$ . Момент будет поворачивать ОВ против часовой стрелки. По мере поворота ротора плечо  $h$  увеличивается по закону  $h=h_{max} \sin \theta$ , где  $\theta$  – угол между осями ротора и поля  $\Phi_{cm,0}$  статора. Значения сил  $F$  будут неизменными, а момент  $M$  будет возрастать до тех пор, пока ротор займет перпендикулярное к полю  $\Phi_{cm,0}$  положение с  $\theta=90^\circ$ . При дальнейшем повороте ротора до угла  $\theta=180^\circ$  плечо сил  $F$  будет уменьшаться и будет уменьшаться момент по закону синуса от угла  $\theta$ .

Если рассмотреть взаимодействие ОВ полем  $\Phi_{cm,60}$ , то все описанные зависимости вращающего момента будут такими же, но сдвинутыми на  $60^\circ$ .

Таким образом, вращающий момент ротора в цикле изменяется по зависимости (рис. 4.33, б и в)

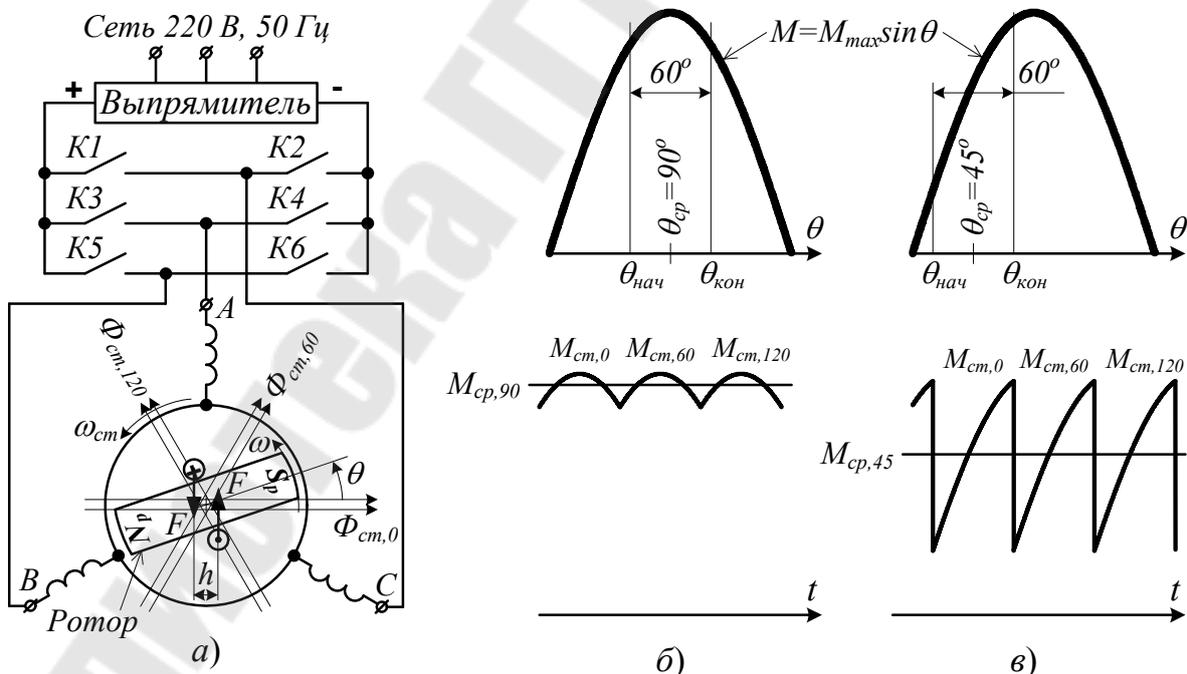


Рисунок 4.33 - Вентильный двигатель: схема питания (а), угловые характеристики вращающего момента и средний момент при  $\theta_{cp}=90^\circ$  (б) и  $45^\circ$  (в)

$$M = M_{\max} \sin \theta,$$

которая называется угловой характеристикой СД.

### **Алгоритм управления ключами инвертора**

Для получения максимального вращающего момента ВД необходимо включать поле  $\Phi_{ст,0}$  при угле  $\theta_{нач}=60^\circ$ , а выключать при угле  $\theta_{нач}=120^\circ$  (рис. 4.33, б) при одновременном включении поля  $\Phi_{ст,60}$  и т.д. Средний угол  $\theta$  для такого управления будет равен  $\theta_{ср}=0,5(\theta_{нач}+\theta_{кон})=90^\circ$ , а среднее значение вращающего момента, обозначенного как  $M_{ср}$ , будет максимальным. Для получения меньшего среднего вращающего момента нужно углы  $\theta_{нач}$  и  $\theta_{кон}$  сдвинуть влево, оставив между ними интервал по углу равным  $60^\circ$  (рис. 4.33, в).

В отличие от СД, получающего питание от нерегулируемой сети, ВД, получающий питание от преобразователя частоты, имеет следующие новые возможности:

1) можно регулировать частоту вращения СД с помощью изменения частоты, с которой производится коммутация ключей  $K1...K6$  преобразователя;

2) можно регулировать вращающий момент СД изменением угла  $\theta_{ср}=0,5(\theta_{нач}+\theta_{кон})$ .

Для реализации этих возможностей необходимо иметь датчик угла нагрузки  $\theta$  СД.

### **Вопросы и задания**

1. Поясните способ формирования дискретно вращающегося магнитного поля статора.
2. Обоснуйте вид угловой характеристики вращающего момента ВД.
3. Как можно управлять моментом ВД?

### **4.21 Двигатели с постоянными магнитами и гистерезисные двигатели**

В системах автоматики широко используются синхронные двигатели малой мощности, называемые микромашинами, из-за постоянства частоты вращения их, например, в самопишущих приборах, моторных реле времени и др. В микромашинах ротор мал по размерам, и для создания его магнитного поля практически всегда экономически выгодно вместо обмотки возбуждения устанавливать постоянные магниты. СД с постоянными магнитами не требуют источника напряжения возбуждения, что является важнейшим аргументом в пользу СД с постоянными магнитами.

Двигатели с постоянными магнитами классифицируются по способу размещения на роторе постоянного магнита на радиальные (рис. 4.34, а) и аксиальные (рис. 4.34, б).

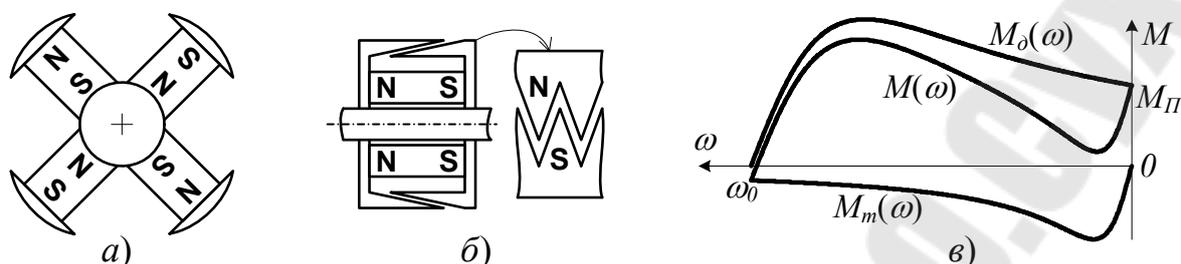


Рисунок 4.34 - Синхронные микромашины с постоянными магнитами: с радиальным (а) и аксиальным (б) расположением магнитов и механические характеристики микромашин (в)

У двигателя с радиальным расположением магнитов (рис. 4.34, а) вал должен быть стальным, чтобы проводил магнитный поток.

У двигателя с аксиальным (вдоль оси вала) расположением магнита вал должен быть немагнитным. Поле магнита, минуя вал, замыкается на полюсные наконечники когтеобразного вида (рис. 4.34, б). В зазоре между расположенными напротив когтями создается магнитное поле возбуждения синхронной микромашины.

Статор рассмотренных двигателей включается в трехфазную сеть и назначением статора является создание вращающегося магнитного поля.

Механическая характеристика двигателя с постоянными магнитами такова, что двигатель может разогнаться, только будучи разгруженным. В рассматриваемом двигателе существуют как двигательный  $M_\delta$ , так и тормозной  $M_m$  моменты (рис. 4.36, в). Двигательный момент  $M_\delta$  возникает за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с короткозамкнутой обмоткой ротора. тормозной момент  $M_m$  возникает за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля магнитов ротора с неподвижной в пространстве обмоткой статора. Момент, приложенный к статору, естественно не может его начать вращать. А такой же по величине момент, но другого знака приложен к ротору навстречу его вращению, т.е. тормозит разгон ротора. График суммарного момента  $M=M_\delta-M_m$  имеет провал на малой частоте вращения двигателя. Из-за этого провала момента двигатель не запускается под нагрузкой.

Отметим особенность устройства ротора рассмотренных двигателей. Часто на роторе нет никакой специально изготовленной короткозамкнутой обмотки, а есть ротор, поверхность которого, обращенная к статору, выполнена монолитной (не из листов электротехнической стали). Поверх-

ность такого ротора можно считать как большое число стержней, которые плотно прижаты друг к другу, что и заменяет ротор нормального исполнения.

Гистерезисные двигатели содержат ротор из материала, который обладает широкой петлей гистерезиса характеристики намагничивания (рис. 4.35, а).

Статор содержит трехфазную обмотку, которая включается в трехфазную сеть. Назначением статорной обмотки является создание вращающегося магнитного поля с напряженностью  $H_{cm}$ .

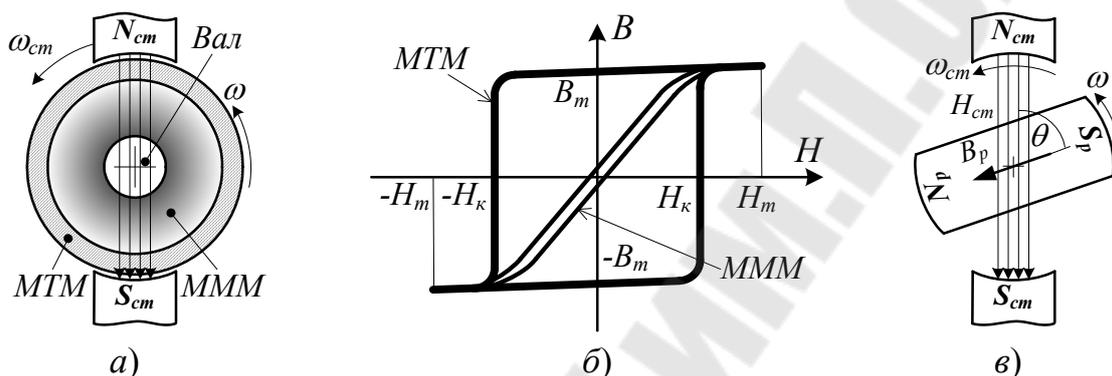


Рисунок 4.35 - Синхронный гистерезисный двигатель: устройство (а), кривые намагничивания МТМ и МММ (б) и принцип действия (в)

Вал ротора окружен бочкой из магнитомягкого материала (МММ) с очень узкой петлей гистерезиса кривой намагничивания стали (рис. 4.35, б). Бочка выполнена шихтованной из пластин электротехнической стали. Поверх бочки надет сплошной стакан из магнитотвердого материала (МТМ) прямоугольной петлей гистерезиса. Если напряженность  $H$  магнитного поля, в которое помещен стакан, больше напряженности коэрцитивной силы  $H_k$ , стакан намагничивается до индукции магнитного поля  $B_m$ . Это поле стакана остается после снятия внешнего поля, каким является поле статора. Ротор становится магнитом. Размагнитить ротор нельзя, а можно только перемагнитить, поместив его в поле с напряженностью  $-H_k$ .

Далее рассмотрим два режима работы гистерезисного двигателя:

- 1) синхронный рабочий режим;
- 2) асинхронный пусковой режим.

### Синхронный режим работы

Это основной режим работы гистерезисного двигателя, когда ротор, втянувшись в синхронизм, вращается с частотой  $\omega$  совпадающей с частотой вращения  $\omega_{cm}$  поля статора. Стакан ротора не перемагничивается и ро-

тор превращается в постоянный магнит (рис.4.35,б). Возникает синхронный неявнополюсный момент.

### *Асинхронный режим работы*

Это режим разгона гистерезисного двигателя. Вращающий асинхронный момент содержит две составляющие – моменты  $M_{кз}$  и  $M_{Г}$  (рис. 4.36, б).

Момент  $M_{кз}$  образуется при взаимодействии вращающегося поля статора со стержнями короткозамкнутой обмотки ротора. Стержни для сплошного ротора являются воображаемыми, если считать что сплошное тело стакана состоит из бесконечного числа стержней, которые плотно примыкают друг к другу, образуя реальный сплошной ротор. График механической характеристики  $M_{кз}$  приведен на рис. 4.36, б.

Построения, приведенные на рис. 4.36, а, поясняют образование гистерезисного асинхронного момента  $M_{Г}$ . Если ротор во вращении отстает от поля статора ( $\omega < \omega_{cm}$ ), то стакан ротора периодически перемагничивается. Пусть напряженность  $H_{cm}$  магнитного поля статора относительно выделенного участка на стакане из МТМ изменяется по гармонической зависимости  $H_{cm}(t)$ . Когда напряженность  $H_{cm}(t)$  проходит уровень коэрцитивной силы  $\pm H_k$ , то индукция магнитного поля ротора скачком принимает значения  $\pm B_p$ . График  $B_p(t)$  представляет собой симметричный меандр, который сдвинут относительно графика  $H_{cm}(t)$  на угол  $\lambda_T$ , называемый углом магнитного трения магнитотвердого материала. Угол  $\lambda_T$  прямо пропорционален ширине петли гистерезиса МТМ. Вращающий момент, создаваемый при взаимодействии магнитного поля ротора с индукцией  $B_p$  с проводниками статора, обтекаемыми токами статора, которые создают поле статора с напряженностью  $H_{cm}$ , естественно пропорционален произведению  $B_p$  и  $H_{cm}$ :

$$M = k B_p H_{cm}.$$

График  $M(t)$  приведен на рис. 4.36, а. Среднее значение момента  $M_{cp}$  и является моментом  $M_{Г}$  и оно равно

$$M_{Г} = M_{cp} = \frac{2}{\pi} M_m \cos \lambda_T. \quad (4.31)$$

Из формулы (4.31) следует, что момент МГ не зависит от частоты вращения гистерезисного двигателя и для его увеличения нужно брать материал стакана из МТМ с максимально узкой прямоугольной петлей гистерезиса.

Суммарная механическая характеристика  $M(\omega)$  имеет очень большой пусковой момент  $M_{II}$ . Двигатель легко разгонится под нагрузкой, что является его безусловным достоинством.

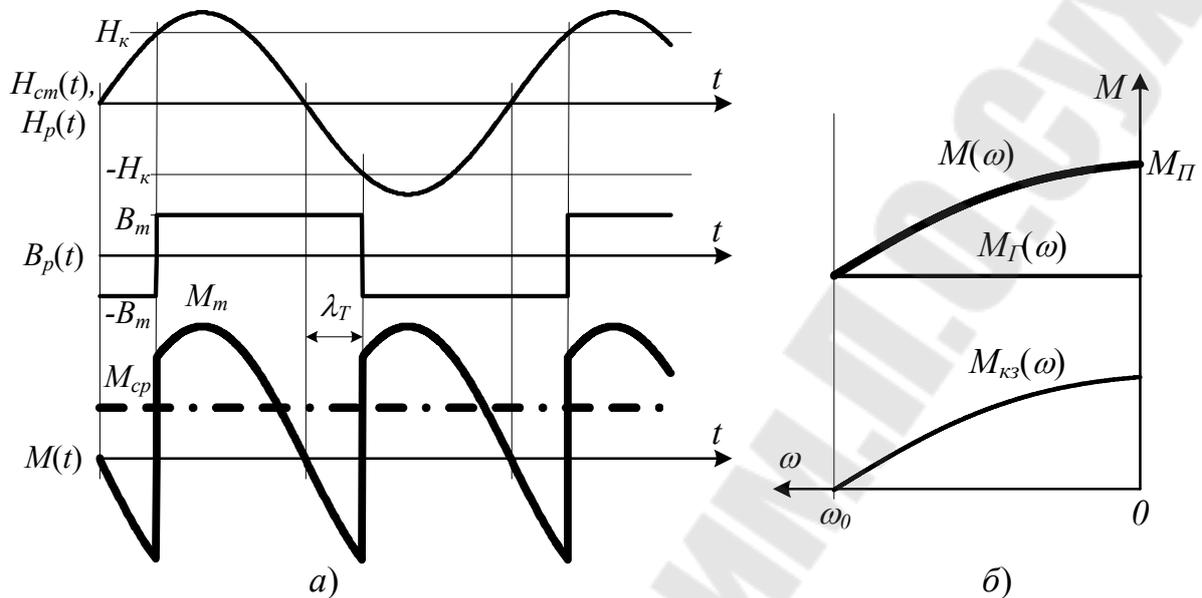


Рисунок 4.36 - Синхронный гистерезисный двигатель: образование асинхронного гистерезисного момента  $M_G$  (а) и механические характеристики (б)

### Вопросы и задания

1. Поясните устройство и принцип действия синхронных микромашин с постоянными магнитами.
2. Поясните вид МХ двигателя с постоянными магнитами.
3. Поясните устройство гистерезисного двигателя и его работу при синхронной частоте вращения.
4. Поясните вид асинхронной МХ гистерезисного двигателя.

### 4.22 Шаговые двигатели

В системах автоматики чаще вращательного необходимо поворотное движение вала на заданный угол. Такое движение обеспечивают шаговые двигатели (ШД).

Статор ШД содержит четное число катушек, которые создают сосредоточенные магнитные поля требуемой ориентации в пространстве (рис. 4.37, а). Назначением статора состоит в формировании множества дискретно направленных векторов магнитного поля статора.

Ротор ШД выполняется всегда явнополюсным. Конструктивно он может состоять либо из радиально расположенных постоянных магнитов (рис. 4.34, *a*), либо иметь явно выраженные полюса без обмоток, как у синхронно-реактивного двигателя (рис. 4.32, *a*) при резком отличии индуктивных сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$  (рекомендуемое неравенство  $x_d > 3x_q$ ).

На примере ШД с восемью катушками рассмотрим принцип формирования дискретно направленных векторов магнитного поля статора (рис. 4.37, *a*). Угол между соседними катушками составляет  $45^\circ$ . Поля катушек направлены по их осям.

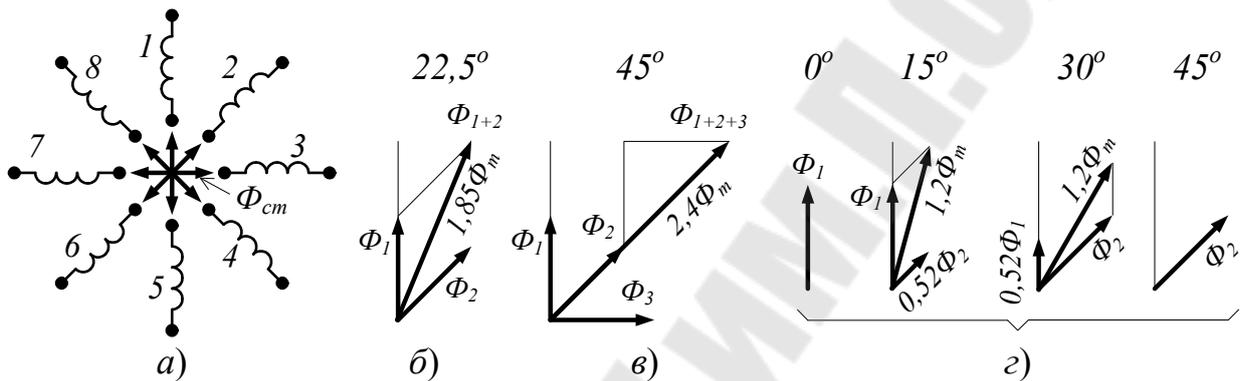


Рисунок 4.37 - Шаговый двигатель: устройство статора (*a*); повороты дробный на  $1/2$  (*a*), целый усиленный (*в*) и дробный на  $1/3$  (*г*)

Варианты питания катушек:

1. Питание подводится только к одной из катушек (рис. 4.37, *a*). Повороты целые, равные углу между катушками, и составляют  $45^\circ$ .

2. Питание подводится только к парам соседних катушек (рис. 4.37, *б*). Повороты дробные, равные  $45^\circ$ , но сдвинутые на  $22,5^\circ$  относительно поворот в предыдущем питании статора. Суммарное поле в  $1,85$  раз больше поля каждой из катушек. Это позволяет получить на валу ШД увеличенный вращающий (поворачивающий) момент.

3. Питание подводится только к трем соседним катушкам (рис. 4.37, *в*). Повороты целые, равные углу между катушками, и составляют  $45^\circ$ . Суммарное поле в  $2,4$  раз больше поля каждой из катушек. Это позволяет получить на валу ШД увеличенный вращающий (поворачивающий) момент.

4. Питание подводится то к одной из катушек, то к парам соседних катушек. Повороты дробные, равные половине угла между катушками, и составляют  $22,5^\circ$ . Суммарное поле то номинальной, то в  $1,85$  раза больше поля каждой из катушек.

5. Питание, чередующееся так, как показано на рис. 4.37, *г*. Повороты дробные, равные одной трети угла между катушками, и составляют  $15^\circ$ .

Характеристиками вращающего момента ШД являются либо угловая характеристика СД (рис. 4.17), либо угловая характеристика синхронно-реактивного двигателя (рис. 4.32, в).

Качество работы ШД оценивается статическими и динамическими погрешностями отработки угла поворота вала, который обозначим как  $\alpha$  (рис. 4.38).

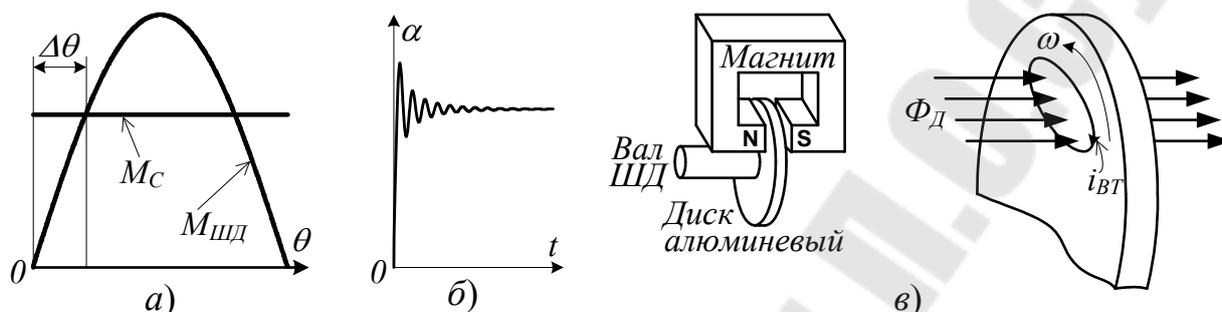


Рисунок 4.38 - Статическая (а) и динамическая ошибки (б) отработки угла поворота вала ШД, электромагнитный демпфер (в)

Статическая ошибка  $\Delta\alpha$  оценивается по расхождению угла поворота ротора ШД от заданных алгоритмом включения его обмоток (рис. 4.37). Для ненагруженного ШД ошибка  $\Delta\alpha=0$ . У нагруженного моментом  $M_C$  ШД ротор отклоняется на угол  $\Delta\theta$  (рис.4.38,а) возникает ошибка  $\Delta\alpha=\Delta\theta$ . Для уменьшения этой ошибки нельзя перегружать ШД сверх момента, указанного в паспорте на ШД. ШД с магнитами имеют меньшую статическую погрешность, чем ШД типа синхронно-реактивного двигателя.

Динамические ошибки ШД связаны с однократным поворотом и с непрерывным вращением ротора.

При однократном повороте в новом положении возникают затухающие колебания ротора (рис. 4.38, б). Для подавления колебаний к ротору подсоединяют демпферные устройства как механического, так и электрического типа. Электромагнитный демпфер (рис. 4.38, в) представляет собой магнит, внутри которого вращается присоединенный к валу ШД диск из немагнитного материала (алюминия). Диск можно рассматривать как бесконечное множество замкнутых контуров, плотно прилегающих друг к другу. При быстром вращении диска на участке колебаний вала ШД в контурах индуктируются вихревые токи  $i_{BT}$ , которые при взаимодействии с полем магнита создают тормозящую силу, которая направлена навстречу ускоренному вращению ротора.

В режиме непрерывного вращения с большой частотой переключения катушек статора ШД (4...5 кГц) возникает угловое отставание ротора от поля статора. Для уменьшения этой погрешности нужно уменьшать мо-

мент инерции ротора и подключенной к нему механической нагрузки. Для уменьшения момента инерции ротора ШД его выполняют в виде тонкостенного стакана, к наружной части которого прикреплены постоянные магниты.

### **Вопросы и задания**

1. Поясните принцип формирования дискретных углов поворота ШД.
2. Какие существуют погрешности в работе ШД и как их уменьшить?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для вузов / А. И. Вольдек. – М. : Энергия, 1978. – 832 с.
2. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
3. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М. : Энергоиздат, 1986. – 360 с.
4. Мезин, Е. К. Судовые электрические машины : учеб. для вузов / Е. К. Мезин. – Ленинград : Судостроение, 1985. – 320 с.
5. Костенко, М. П. Электрические машины: в 2 ч. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энергия, 1972. – Ч. 1 : Машины постоянного тока. Трансформаторы : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 544 с.
6. Костенко, М. П. Электрические машины: в 2 ч. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энергия, 1973. – Ч. 2 : Машины переменного тока : учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 648 с.
7. Китаев, В. Е. Электрические машины: в 2ч. / В. Е. Китаев, Ю. М. Корхов, В. К. Свирин / под ред. В. Е. Китаева. – М. : Высш. шк., 1978. – Ч. 1 : Машины постоянного тока. Трансформаторы. – 184 с.
8. Китаев, В. Е. Электрические машины: в 2 ч. / В. Е. Китаев, Ю. М. Корхов, В. К. Свирин / под ред. В. Е. Китаева. – М. : Высш. шк., 1978. – Ч.2 : Машины переменного тока. – 184 с.
9. Токарев, Б.Ф. Электрические машины : учеб. пособие для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 ТРАНСФОРМАТОРЫ	7
1.1 Устройство и принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации напряжений	7
1.2 Работа однофазного трансформатора под нагрузкой. Трансформация токов	9
1.3 Индуктивное сопротивление рассеяния. Приведенный однофазный трансформатор. Пересчет параметров вторичной обмотки	10
1.4 Опыты холостого хода и короткого замыкания однофазного трансформатора	15
1.5 Уравнения однофазного трансформатора. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора	18
1.6 Внешняя характеристика однофазного трансформатора. Расчет потерь напряжения	20
1.7 Энергетическая диаграмма и КПД однофазного трансформатора	23
1.8 Устройство трехфазного трансформатора и группы соединения его обмоток	25
1.9 Уравнения трехфазного трансформатора. Векторные диаграммы нагруженного трансформатора	28
1.10 Параллельная работа трехфазных трансформаторов	31
1.11 Влияние группы соединения обмоток на форму вторичного напряжения трансформатора	34
1.12 Переходные процессы при коротком замыкании трансформатора	38
1.13 Переходные процессы при включении трансформатора в сеть	41
1.14 Автотрансформатор, устройство, принцип действия, основные характеристики	43
1.15 Сварочные трансформаторы, устройство, принцип действия, основные характеристики	45
1.16 Измерительные трансформаторы напряжения и тока	46
2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	50
2.1 Устройство и принцип действия трехфазного АД	50
2.2 Работа заторможенного АД при разомкнутом и замкнутом роторе	52

2.3 Работа вращающегося АД. Параметры ЭДС и тока ротора. Энергетическая диаграмма и вращающий момент АД	53
2.4 Приведение ротора к статору. Схемы замещения АД	56
2.5 Механическая и электромеханическая характеристики АД	59
2.6 Упрощенная и полная формулы Клосса АД	62
2.7 Устойчивости работы АД "в малом" и "в большом"	64
2.8 Устройство и принцип действия АД с двухклеточным и глубокопазым ротором	67
2.9 Механические характеристики АД с двухклеточным и глубокопазым ротором	72
2.10 Определение параметров двухклеточного ротора по каталожным данным АД	74
2.11 Способы пуска АД	79
2.12 Частотное регулирование вращения АД по цепи статора	82
2.13 Регулирование частоты вращения АД с фазным ротором	86
2.14 Полюсопереключаемые АД	89
2.15 Способы торможения АД	93
3 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	97
3.1 Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ)	97
3.2 Устройство и принцип действия генератора постоянного тока (ГПТ)	100
3.3 Поперечная реакция якоря в МПТ	103
3.4 Магнитодвижущие силы и ЭДС обмоток МПТ	108
3.5 Уравнение коммутации МПТ, виды коммутация. Средства улучшения коммутации	110
3.6 Двигатель параллельного возбуждения и его рабочие характеристики	115
3.7 Двигатель последовательного возбуждения и его рабочие характеристики	118
3.8 Двигатель смешанного возбуждения и его рабочие характеристики	120
3.9 Способы пуска ДПТ	122

3.10 Способы регулирования частоты вращения	120
3.11 Способы торможения ДПТ	130
3.12 Генератор независимого возбуждения и его рабочие характеристики	134
3.13 Генератор параллельного возбуждения и его рабочие характеристики	136
3.14 Генераторы смешанного возбуждения и его рабочие характеристики	139
3.15 Условия параллельной работы ГПТ. Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности	140
3.16 Короткое замыкание ГПТ	144
3.17 Энергетические диаграммы и коэффициент полезного действия МПТ	147
4 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	151
4.1 Устройство, принцип действия синхронного генератора (СГ)	151
4.2 Реакция якоря СГ при различных характерах нагрузки. Метод двух реакций	154
4.3 Уравнения электрического состояния и векторная диаграмма явнополюсного СГ	157
4.4 Уравнения электрического состояния и векторная диаграмма неявнополюсного СГ	160
4.5 Упрощенные уравнения электрического состояния и векторные диаграммы неявнополюсных и явнополюсных СГ	162
4.6 Характеристики холостого хода, нагрузочная и короткого замыкания	164
4.7 Внешние характеристики СГ	167
4.8 Регулировочные характеристики СГ	170
4.9 Мощность и электромагнитный момент СГ	172
4.10 Статическая устойчивость СГ	175
4.11 Условия параллельной работы СГ. Включение СГ на параллельную работу	176
4.12 Принципы регулирования активной и реактивной мощностей СГ	179
4.13 Работа СГ с регулируемой активной мощностью	181

4.14 Работа СГ с регулируемой реактивной мощностью. U-образная характеристика СГ	183
4.15 Параллельная работа соизмеримых по мощности СГ	186
4.16 Системы возбуждения СГ	189
4.17 Устройство и принцип действия синхронного двигателя	192
4.18 Пуск в ход СД. Рабочие характеристики СД	195
4.19 Синхронный компенсатор. Синхронно-реактивный двигатель	198
4.20 Вентильные двигатели	201
4.21 Двигатели с постоянными магнитами и гистерезисные двигатели	203
4.22 Шаговые двигатели	207
ЛИТЕРАТУРА	211

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Учебно-методическое пособие  
по одноименной дисциплине  
для студентов специальностей**

**1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,**

**1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»**

**и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

Составители: **Козлов Андрей Владимирович**  
**Медведев Константин Михайлович**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 22.10.20.

Рег. № 62Е.

<http://www.gstu.by>