

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»

О.С. Щукин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

• *ТРАНСФОРМАТОРЫ*

• *АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ*

Курс лекций

Нижевартовск
2019

УДК 621.313
ББК 31.261я73
Щ 95

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
Нижевартовского государственного университета

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника»
Омского государственного технического университета *К.И. Никитин*;
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных
предприятий» Омского государственного технического университета *П.В. Рысев*

Щукин, О. С.

Щ 95 **Электрические машины. Трансформаторы. Асинхронные машины** : курс лекций / О.С. Щукин. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2019. – 109 с.

ISBN 978-5-00047-505-8

В учебном издании изложены теоретические и физические принципы работы трансформаторов и асинхронных машин, а также методы испытания всех основных типов электрических машин. Даются основные сведения о нормативных и промышленных испытаниях электрических машин. Материал курса лекций сопровождается примерами решения задач и может быть использован при выполнении учебных лабораторных работ и проведении исследовательской работы студентов.

Учебное издание предназначено для студентов старших курсов электроэнергетических специальностей.

ББК 31. 261я73

ISBN 978-5-00047-505-8

© Щукин О.С., 2019

© Нижневартовский государственный университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава 1. Принцип действия и элементы теории трансформатора	5
1.1. Принцип действия трансформатора	5
1.2. Уравнения напряжений, схема замещения, векторная диаграмма трансформатора	7
1.3. Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора	14
Глава 2. Трехфазные трансформаторы	19
2.1. Общие сведения о трехфазных трансформаторах	19
2.2. Группы соединений обмоток трансформаторов	21
2.3. Типы трехфазных трансформаторов. Основные расчетные соотношения	25
2.3.1. Г-образная схема замещения	25
2.3.2. Двухобмоточный трансформатор	26
2.3.3. Трехобмоточный трансформатор	27
2.3.4. Трансформаторы с расщепленной обмоткой	29
2.3.5. Автотрансформаторы	31
Глава 3. Режимы работы трансформаторов	37
3.1. Включение трансформатора в сеть	37
3.2. Параллельная работа трансформаторов	38
3.2.1. Параллельная работа трансформаторов при неравенстве коэффициентов трансформации	39
3.2.2. Работа трансформаторов с разными группами соединения обмоток	40
3.2.3. Работа трансформаторов при неодинаковых напряжениях короткого замыкания	41
3.3. Регулирование напряжения	44
3.3.1. Способы регулирования напряжения	44
3.3.2. Регулирование напряжения устройствами РПН	45
3.3.3. Последовательные регулировочные трансформаторы	47
Глава 4. Конструктивная схема трансформатора	48
4.1. Общие сведения	48
4.2. Конструктивные элементы активной части трансформатора	49
4.3. Конструктивные элементы вспомогательной части трансформатора	54
4.4. Системы охлаждения трансформатора	57
4.5. Контрольно-измерительная и защитная аппаратура	59
4.6. Электротехнические стали	61
4.7. Основные параметры трансформатора	62
4.8. Классификация силовых трансформаторов	63

РАЗДЕЛ 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Глава 5. Образование вращающегося магнитного поля и конструкции обмоток машин переменного тока.....	65
5.1. Принцип образования вращающегося магнитного поля и его параметры	65
5.2. Обмотки машин переменного тока	68
5.3. Способы улучшения формы ЭДС в обмотках статора и ротора.....	73
5.4. Определение начал и концов обмоток статора трехфазных электрических машин	76
Глава 6. Принцип действия, конструкция и элементы теории асинхронной машины	79
6.1. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.....	79
6.2. Схемы замещения и векторные диаграммы асинхронной машины	82
6.3. Энергетические диаграммы асинхронной машины	86
6.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя	90
Глава 7. Эксплуатационные характеристики и режимы асинхронного двигателя	91
7.1. Механическая характеристика асинхронной машины.....	91
7.2. Асинхронные двигатели с изменяющимся сопротивлением обмотки ротора.....	94
7.3. Пуск асинхронных двигателей	98
7.4. Регулирование скорости вращения	100
7.5. Неноминальные режимы асинхронных двигателей	102
7.6. Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей.....	104
7.7. Однофазный режим асинхронных двигателей.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109

РАЗДЕЛ 1

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформаторы и автотрансформаторы – связующее звено между источниками и потребителями электроэнергии, и в этой функции они являются ключевыми компонентами современной электроэнергетической системы. Без этих устройств невозможно представить современную электроэнергетику, а роль, которую они выполняют, трудно переоценить.

Как в трансформаторах, так и в автотрансформаторах энергия передается из одной обмотки в другую, и при этом происходит изменение ее параметров. Хотя передача энергии происходит электромагнитным путем, механизмы передачи у трансформатора и автотрансформатора несколько отличаются.

ГЛАВА 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более обмотки, связанные между собой общим электромагнитным полем. Трансформаторы предназначены для преобразования параметров переменного тока: величины напряжения, частоты, числа фаз, однако наиболее распространенное назначение трансформаторов – преобразование величины напряжения. Далее будет рассматриваться именно этот тип трансформаторов. (Для преобразования частоты и числа фаз применяются специальные типы трансформаторов, которые имеют специфическую конструкцию, и принципы работы этих трансформаторов здесь не рассматриваются).

1.1. Принцип действия трансформатора

На рисунке 1.1 изображен трансформатор, состоящий из магнитопровода (3) и двух обмоток (1) и (2). Магнитопровод выполнен из стали с высокой магнитной проницаемостью, что позволяет усиливать и концентрировать внутри магнитопровода почти весь магнитный поток трансформатора. Магнитопровод шихтован, т. е. набран из тонких листов электротехнической стали (применяют листы стали толщиной 0,5; 0,35; 0,27 мм). Обмотки имеют разные числа витков w_1 и w_2 , в дальнейшем они будут называться «первичная» и «вторичная».

Первичная обмотка (1) подключена к сети и получает из сети электроэнергию. За счет электромагнитной связи, обеспеченной магнитопроводом, электроэнергия из первичной обмотки передается во вторичную обмотку (2), при этом изменяются ее параметры, и в таком виде она отводится к потребителю.

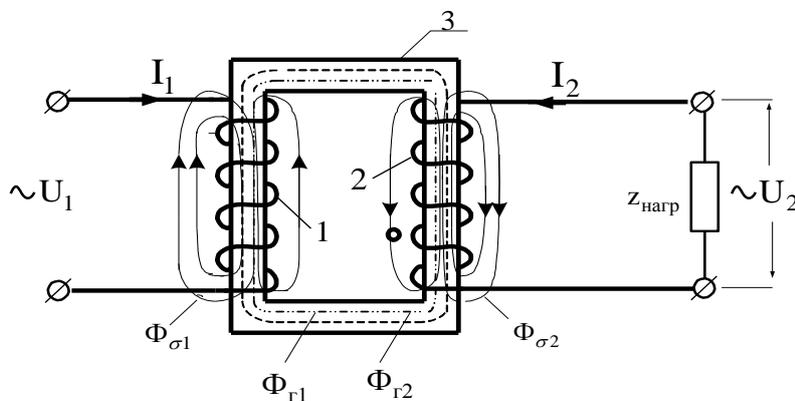


Рис. 1.1. Упрощенное изображение трансформатора с иллюстрацией его магнитных полей

Рассмотрим физический процесс передачи энергии из одной обмотки в другую, разбив его на несколько логически законченных этапов.

Этап 1. При включении первичной обмотки в сеть переменного синусоидального напряжения U_1 по ней потечет синусоидальный ток I_1 , который создаст синусоидальный магнитный поток Φ_1 . Этот поток условно разделим на две части:

$$\Phi_1 = \Phi_{\Gamma 1} + \Phi_{\sigma 1}.$$

Поток $\Phi_{\Gamma 1}$ замыкается по магнитопроводу, благодаря чему сцепляется с обеими обмотками, индуцируя в них ЭДС, чем и обеспечивается передача мощности из одной обмотки в другую. Поток $\Phi_{\Gamma 1}$ называют *главным магнитным потоком первичной обмотки*. Другая часть магнитного потока первичной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ проходит в основном по воздуху, и его особенностью является то, что он сцепляется только со своей обмоткой и поэтому не участвует в передаче энергии, но зато является причиной рассеивания энергии. В силу этого поток $\Phi_{\sigma 1}$ называют *потоком рассеяния*.

Этап 2. Поток $\Phi_{\Gamma 1}$, сцепляясь с вторичной обмоткой, вызывает в ней синусоидальную электродвижущую силу E_2 . При подключении вторичной обмотки к сопротивлению нагрузки под действием E_2 в обмотке появится ток I_2 , который в свою очередь создаст аналогичные магнитные потоки $\Phi_{\Gamma 2}$ и $\Phi_{\sigma 2}$:

$$\Phi_2 = \Phi_{\Gamma 2} + \Phi_{\sigma 2}.$$

Этап 3. Два главных магнитных потока, складываясь, образуют в сердечнике трансформатора результирующий магнитный поток, который называют *главным магнитным потоком трансформатора*:

$$\dot{\Phi}_C = \dot{\Phi}_{\Gamma 1} + \dot{\Phi}_{\Gamma 2}. \quad (1.1)$$

Итак, в результате описанных физических процессов магнитное поле в трансформаторе разделено на три характерных магнитных потока:

- Φ_C – главный (рабочий) магнитный поток, который проходит по магнитопроводу, благодаря магнитным свойствам стали имеет значительную величину, индуцирует в обмотках значительную ЭДС и обеспечивает передачу энергии из одной обмотки в другую;
- $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ – потоки рассеяния, проходят в основном по воздуху, встречают на своем пути значительное магнитное сопротивление и поэтому малы по сравнению с главным магнитным потоком.

Коэффициент трансформации определяет уровень изменения величины напряжения на обмотках трансформатора. Эта функция трансформатора является наиболее распространенной в современной электроэнергетике.

Если на первичную обмотку трансформатора с числом витков w_1 подается синусоидальное напряжение U_1 , то на вторичной обмотке с числом витков w_2 напряжение будет другим $U_2 \neq U_1$. Для количественной оценки этого преобразования вводят понятие коэффициента трансформации и определяют его как:

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (1.2)$$

Определим факторы, влияющие на величину этого коэффициента, для чего запишем уравнения напряжений для обмоток трансформатора.

Так как первичная обмотка принимает энергию из сети с напряжением U_1 , то ток в ней создается двумя источниками: напряжением сети и электродвижущей силой, созданной магнитным полем, отсюда уравнение баланса напряжений будет следующим:

$$u_1 + e_1 = i_1 r_1. \quad (1.3)$$

Вторичная обмотка отдает энергию потребителю, поэтому в ней только один источник тока – ЭДС от магнитного поля, что дает следующее уравнение баланса напряжений:

$$e_2 = i_2 r_2 + u_2, \quad (1.4)$$

где $u_2 = i_2 Z_{\text{наг}}$ – падение напряжения на сопротивлении нагрузки.

Далее воспользуемся моделью идеального трансформатора, у которого нет потерь энергии, поэтому примем $r_1 = 0, r_2 = 0$. Тогда уравнения (1.3) и (1.4) примут вид:

$$u_1 = e_1, \quad u_2 = e_2.$$

Определим мгновенные значения ЭДС в обмотках при синусоидальном изменении магнитного потока в сердечнике $\Phi_c = \Phi_m \sin(\omega t)$:

$$e_1 = - \frac{d\Psi_1}{dt} = - w_1 \frac{d}{dt} \Phi_m \sin(\omega t) = - w_1 \omega \Phi_m \cos(\omega t) = - E_{m1} \cos(\omega t),$$

$$e_2 = - \frac{d\Psi_2}{dt} = - w_2 \frac{d}{dt} \Phi_m \sin(\omega t) = - w_2 \omega \Phi_m \cos(\omega t) = - E_{m2} \cos(\omega t).$$

Действующие значения этих ЭДС равны:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{w_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f w_1 \Phi_m, \\ E_2 &= \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{w_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot f w_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

На основании последних выражений определим коэффициент трансформации:

$$k_{\text{ТР}} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.6)$$

Следует заметить, что в реальном трансформаторе при учете потерь коэффициент трансформации несколько отличается и определяется так:

$$k_{\text{ТР}} = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.7)$$

Если пренебречь потерями в трансформаторе, то для мощностей можно записать следующее равенство:

$$S_1 = S_2 \text{ или } U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

откуда

$$k_{\text{ТР}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (1.8)$$

1.2. Уравнения напряжений, схема замещения, векторная диаграмма трансформатора

В основе теоретических и практических исследований трансформатора лежит его математическая модель, которая представляется в трех взаимозаменяемых формах, это:

- уравнения баланса напряжений для обмоток (2-е уравнение Кирхгофа);
- схема замещения;
- векторная диаграмма.

Рассмотрим отдельно каждую форму математической модели.

Уравнения баланса напряжений обмоток. Для любого электротехнического устройства можно составить столько уравнений баланса напряжений, сколько обмоток это устройство содержит.

Для трансформатора, изображенного на рисунке 1.1, можно написать два уравнения напряжений, причем при составлении этих уравнений следует учесть, что обмотки находятся в разных энергетических условиях, а именно: обмотка 1 *принимает энергию из сети*, а обмотка 2 *отдает энергию в другую сеть*.

Первичная обмотка подключена к питающей сети с напряжением U_1 , поэтому ток в этой обмотке вызывается:

- 1) напряжением сети U_1 ;
- 2) электродвижущей силой E_{11} , созданной главным магнитным потоком своей обмотки $\Phi_{Г1}$;
- 3) электродвижущей силой E_{12} , созданной главным магнитным потоком вторичной обмотки $\Phi_{Г2}$;
- 4) электродвижущей силой $E_{\sigma 1}$, созданной полем рассеяния первичной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$.

Отсюда уравнение баланса напряжений для первичной обмотки будет следующим (записано для мгновенных значений):

$$u_1 + e_{11} + e_{12} + e_{\sigma 1} = i_1 r_1. \quad (1.9)$$

Вторичная обмотка отдает энергию в сеть, поэтому источником тока в ней являются только ЭДС, их три:

- 1) электродвижущая сила E_{22} , созданная главным магнитным потоком своей обмотки $\Phi_{Г2}$;
- 2) электродвижущая сила E_{21} , созданная главным магнитным потоком первичной обмотки $\Phi_{Г1}$;
- 3) электродвижущая сила $E_{\sigma 2}$, созданная полем рассеяния вторичной обмотки $\Phi_{\sigma 2}$.

Отсюда уравнение баланса напряжений для вторичной обмотки будет следующим:

$$e_{22} + e_{21} + e_{\sigma 2} = i_2 r_2 + u_2. \quad (1.10)$$

Здесь следует отметить, что в отдающей обмотке напряжение U_2 не является источником тока, это просто падение напряжения на сопротивлении нагрузки: $u_2 = i_2 r_{\text{наг}}$.

Перейдем от уравнений для мгновенных значений (1.9), (1.10) к уравнениям в комплексной форме на основании принципов, изложенных в курсе теоретической электротехники:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_{11} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{\sigma 1} &= \dot{I}_1 r_1, \\ \dot{E}_{22} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_{\sigma 2} &= \dot{I}_2 r_2 + \dot{U}_2, \end{aligned}$$

или, используя известную из теории электротехники форму записи для электродвижущей силы $\dot{E} = -j\dot{I}x$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_{\sigma 1} + j(\dot{I}_1 x_{11} + \dot{I}_2 x_{12}), \\ -\dot{U}_2 &= \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 x_{\sigma 2} + j(\dot{I}_2 x_{22} + \dot{I}_1 x_{21}) \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

Данная система уравнений описывает две индуктивно связанные обмотки, но наличие магнитной связи не позволяет проводить исследования трансформатора простыми и эффективными методами теории цепей. Поэтому целью дальнейших преобразований является переход от уравнений с магнитной связью к уравнениям с чисто электрической связью. Математическая процедура, которая будет использована ниже, называется «приведение вторичной обмотки к первичной»¹.

¹ *Примечание.* Отметим, что «приведение нескольких неподвижных или движущихся обмоток к одной из них» – это один из самых распространенных математических процедур в электроэнергетических теориях и расчетах при моделировании индуктивно связанных обмоток, и этот подход к математическому моделированию будет применен ниже при изучении других машин.

Суть преобразований в следующем. Будем считать, что число витков вторичной обмотки равно числу витков первичной обмотки, т. е. в дальнейших расчетах вместо w_2 будем использовать $w'_2 = w_1^2$.

Итак, считаем, что вторичную обмотку привели к первичной обмотке с коэффициентом приведения:

$$k = \frac{w_1}{w_2}.$$

Но поскольку приведенный трансформатор конструктивно изменился, потребуем, чтобы энергетика реального и приведенного трансформаторов была бы эквивалентна. Энергетическая эквивалентность будет выполнена при соблюдении следующих условий:

1) должны быть равны мощности реальной и приведенной вторичных обмоток:

$$\dot{U}_2 \dot{I}_2 = \dot{U}'_2 \dot{I}'_2,$$

откуда получаем условия:

$$\frac{\dot{U}'_2}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}'_2} = \frac{w_1}{w_2} = k;$$

2) должны быть равны электрические потери в реальной и приведенной обмотках:

$$r_2 (I_2)^2 = r'_2 (I'_2)^2,$$

откуда определяется необходимое для соблюдения эквивалентности активное сопротивление приведенной обмотки:

$$r'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 r_2 = k^2 r_2;$$

3) должны быть равны фазовые сдвиги в реальной и приведенной обмотках:

$$\operatorname{tg}(\psi_2) = \frac{r_2}{x_2} = \frac{r'_2}{x'_2},$$

откуда определяется необходимое индуктивное сопротивление приведенной обмотки:

$$x'_2 = \frac{r'_2}{r_2} x_2 = \frac{k^2 r_2}{r_2} x_2 = k^2 x_2.$$

Дальнейшие преобразования связаны с учетом изменения числа витков приведенной обмотки, т. к. изменение числа витков вторичной обмотки приводит к изменению собственных и взаимных индуктивных сопротивлений. Из теории электротехники известно, что сопротивление самоиндукции прямо пропорционально числу витков обмотки в квадрате – w^2 , а сопротивление взаимоиндукции – прямо пропорционально произведению чисел витков индуктивно связанных обмоток $w_1 \cdot w_2$. На этом основании можно записать:

– $x_{11} \sim w_1^2$ – главное индуктивное сопротивление самоиндукции первичной обмотки;

– $x_{22} \sim w_2^2$ $x'_{22} \sim (w'_2)^2 = w_1^2$ – главное индуктивное сопротивление самоиндукции вторичной обмотки;

– $x_{12} \sim w_1 \cdot w_2$ $x'_{12} \sim w_1 \cdot w'_2 = w_1^2$ – главное индуктивное сопротивление взаимоиндукции между первичной и вторичной обмотками;

– $x_{21} \sim w_2 \cdot w_1$ $x'_{21} \sim w'_2 \cdot w_1 = w_1^2$ – главное индуктивное сопротивление взаимоиндукции между вторичной и первичной обмотками.

² *Примечание.* В дальнейшем параметры приведенных обмоток в формулах и векторных диаграммах будут обозначаться штрихом.

Отсюда следует, что все главные индуктивные сопротивления приведенного трансформатора прямо пропорциональны w_1^2 . Но так как все главные индуктивные сопротивления созданы магнитными полями, проходящими по одному и тому же магнитному пути (по сердечнику), то это означает их равенство:

$$x_{11} = x'_{22} = x'_{12} = x'_{21},$$

а это, в свою очередь, позволяет записать систему уравнений (1.11) так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_{\sigma 1} + j x_{11} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2), \\ -\dot{U}'_2 &= \dot{I}'_2 r'_2 + j \dot{I}'_2 x'_{\sigma 2} + j x_{11} (\dot{I}_1 + \dot{I}'_2). \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Но система уравнений (1.12) есть не что иное, как описание двух *чисто электрических контуров* с общим участком цепи, по которому протекает ток, называемый «намагничивающим током» трансформатора:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_\mu, \quad (1.13)$$

и как следует из описанных выше физических процессов, этот ток создает главное магнитное поле трансформатора.

Вывод. Система уравнений (1.12) описывает чисто электрическую схему (т. е. без магнитных связей), являющуюся энергетическим эквивалентом трансформатора.

Схема замещения трансформатора. Формально система уравнений (1.12) позволяет построить как схему замещения, так и векторную диаграмму трансформатора. Однако для более глубокого понимания процессов приведения дадим менее строгое, но более наглядное обоснование перехода от модели с электромагнитной связью к модели с чисто электрической связью. Для этого вернемся к рисунку 1.1 и каждую составляющую магнитного поля заменим соответствующим индуктивным сопротивлением. Так получим физическую модель трансформатора, изображенную на рисунке 1.2 (а).

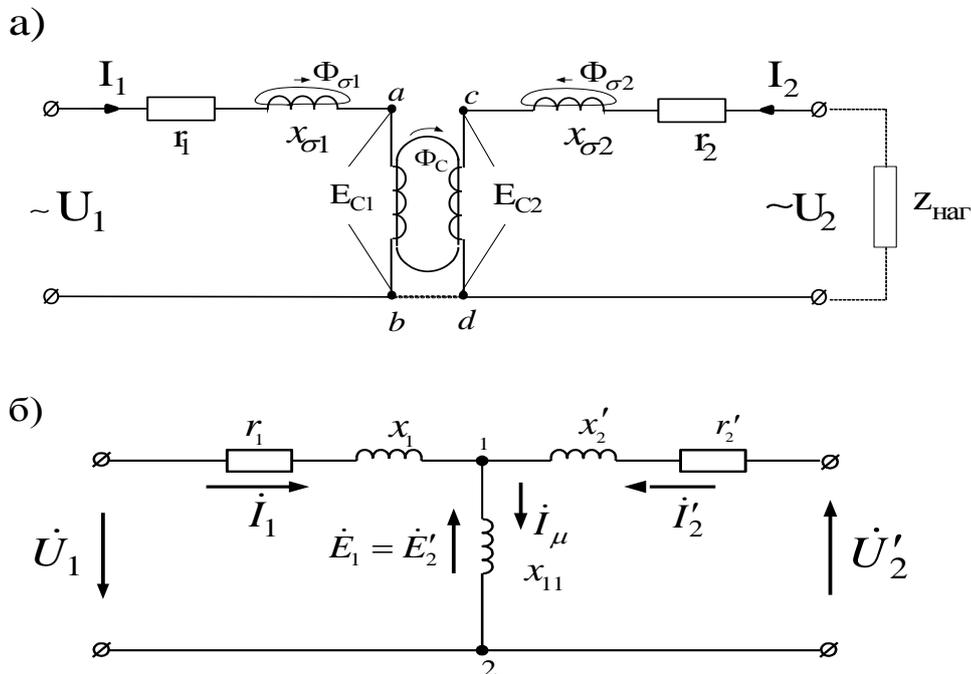


Рис. 1.2. Физическая модель трансформатора с разделением магнитных полей на главные поля и поля рассеяния (а) и схема замещения (б)

Полученная схема не является электрической, т. к. в ней помимо электрических цепей присутствует магнитная связь между обмотками, обеспеченная главным магнитным полем Φ_c . Для получения чисто электрической схемы нужно электрически соединить точки $a-c$ и $b-d$. При соединении точек $b-d$ энергетические процессы в схеме не изменятся, т. к. соединение $b-d$ не приводит к новым электрическим контурам и к новым токам, но если электрически соединить точки $a-c$, то в схеме под действием разности потенциалов E_{c1} и E_{c2} появится ток, которого нет в реальном трансформаторе. На этом этапе и выполняется процедура приведения одной обмотки к другой. Действительно, если считать, что числа витков обмоток равны, например, $w_2 \Rightarrow w_1$, то ЭДС обеих обмоток от главного магнитного поля станут равными, и тогда точки $a-c$ можно соединить электрически.

Формальный переход от схемы с магнитной связью к чисто электрической схеме произведен, но открытым остается вопрос энергетической эквивалентности реального и приведенного трансформаторов. Как было показано ранее, эта эквивалентность достигается заменой реальных сопротивлений вторичной обмотки новыми, приведенными значениями.

До сих пор построение математической модели шло без учета реальной конструкции магнитопровода. Дело в том, что в сердечнике магнитный поток индуцирует ЭДС, также в нем протекают токи (вихревые токи) и происходит его нагрев. Для учета потерь в сердечнике трансформатора воспользуемся известными пропорциональными соотношениями между потерями в стали $p_{\text{мг}}$ и параметрами поля в сердечнике $p_{\text{мг}} \sim B_c^2 \sim \Phi_c^2 \sim E_1^2$.

Также для учета потерь в сердечнике введем в схему замещения активное сопротивление $r_{\text{мг}}$, которое подключим на зажимы, где действует E_1 , а его величину определим из условия: магнитные потери на одну фазу трансформатора равны потерям в этом сопротивлении:

$$\frac{E_1^2}{r_{\text{мг}}} = \frac{p_{\text{мг}}}{m_1}, \quad \text{откуда} \quad r_{\text{мг}} = \frac{m_1 E_1^2}{p_{\text{мг}}}.$$

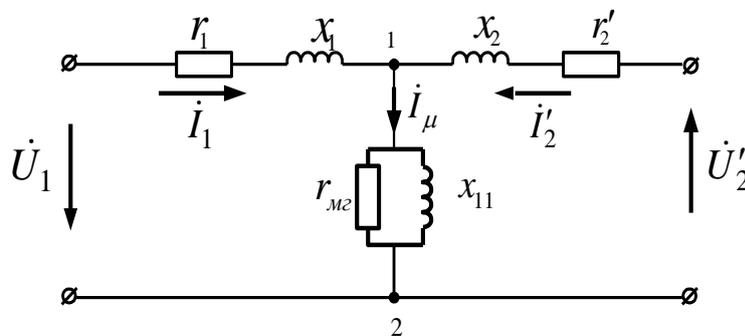


Рис. 1.3. Схема замещения трансформатора с учетом потерь в сердечнике

В практических расчетах обычно пользуются схемой замещения, в которой параллельно включенные сопротивления $r_{\text{мг}}$ и X_{11} заменены полным комплексным сопротивлением Z_{μ} (рис. 1.4):

$$Z_{\mu} = \frac{r_1 \cdot jX_{11}}{r_1 + jX_{11}} = \frac{r_1 X_{11}^2}{r_1^2 + X_{11}^2} + j \frac{r_1^2 X_{11}}{r_1^2 + X_{11}^2} = r_{\mu} + jX_{\mu}.$$

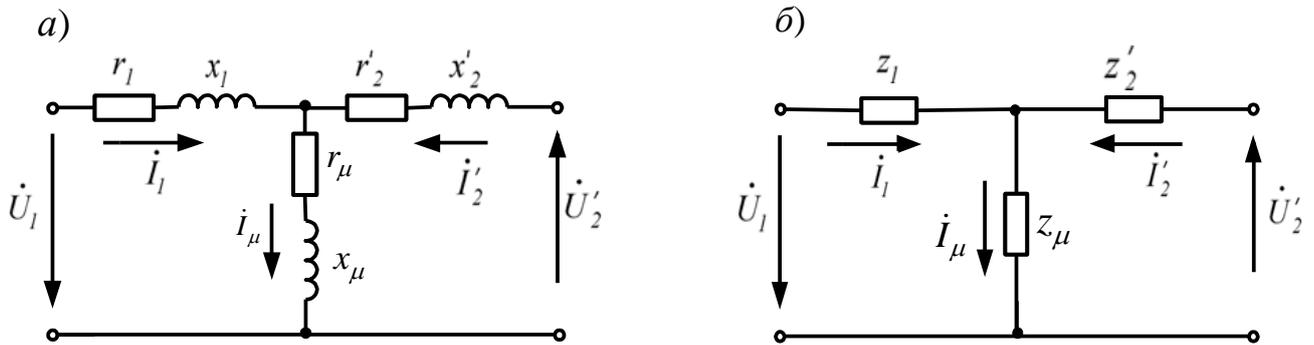


Рис. 1.4. Т-образная схема замещения трансформатора:

- а) развернутая, с разделением сопротивлений на активные и реактивные;
 б) в полных сопротивлениях

Ниже дана физическая трактовка параметров Т-образной схемы замещения трансформатора, где:

- r_1 – учитывает тепловые потери в первичной обмотке от тока I_1 и в металлических элементах конструкции трансформатора от магнитного поля рассеяния этой обмотки;
- r'_2 – учитывает тепловые потери во вторичной обмотке от тока I_2 и в металлических элементах конструкции трансформатора от магнитного поля рассеяния этой обмотки;
- r_μ – учитывает потери активной мощности в магнитопроводе трансформатора, вызванные вихревым током от главного магнитного потока в сердечнике;
- x_μ – учитывает ЭДС в первичной и вторичной обмотках от главного магнитного потока;
- x_1 – учитывает ЭДС в первичной обмотке, которая создается полем рассеяния этой обмотки;
- x'_2 – учитывает ЭДС во вторичной обмотке, которая создается полем рассеяния этой обмотки.

Векторная диаграмма трансформатора – это третья эквивалентная форма записи математической модели трансформатора. Построим векторную диаграмму, например, по Т-образной схеме замещения, изображенной на рисунке 1.4 (напомним, что эту же диаграмму можно построить и по уравнениям (1.12)).

При построении векторной диаграммы учтем известные из теоретической электротехники факты:

- 1) на векторных диаграммах вектор тока совпадает по фазе с вектором магнитного потока (это следует из того, что ток и созданный им магнитный поток – пропорциональные величины);
- 2) ЭДС в обмотке создается магнитным потоком, и при его синусоидальном изменении во времени вектор \dot{E} отстает от вектора потока Φ на 90° . Этот факт представляется также в виде выражения $\dot{E} = -j\dot{I}x$.

Процесс построения диаграммы разделим на четыре этапа:

I. *Процесс намагничивания магнитопровода* (в литературе часто этот процесс называют – возбуждение трансформатора). При включении первичной обмотки в питающую сеть в трансформаторе возникает магнитный поток, на создание которого из сети потребляется намагничивающий ток I_μ . Этот ток содержит активную $I_{\mu a}$ и реактивную $I_{\mu p}$ составляющие. Реактивная составляющая намагничивающего тока идет на создание главного магнитного потока Φ_C , и поэтому вектора $I_{\mu p}$ и Φ_C совпадают по фазе. Активная составляющая $I_{\mu a}$ вызвана тепловыми потерями в магнитопроводе от вихревых токов, и поэтому вектор активной составляющей тока опережает вектор магнитного потока на 90° .

II. *Индуктирование ЭДС в обмотках от главного магнитного поля.* Главный магнитный поток Φ_C сцепляется с обеими обмотками и поэтому индуцирует в них ЭДС. Поскольку рассматривается приведенный трансформатор, то эти ЭДС равны: $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, и их вектора отстают от вектора потока Φ_C на 90° .

III. *Процессы во вторичной обмотке.* Пусть вторичная обмотка подключена к активно-индуктивной нагрузке (это наиболее распространенная в энергетике нагрузка). Поскольку на зажимах вторичной обмотки действует электродвижущая сила \dot{E}'_2 , то при подключении к ней указанной нагрузки в обмотке потечет ток \dot{I}'_2 , отстающий от \dot{E}'_2 на некоторый угол ψ_2 . Далее строим вектора согласно уравнению $\dot{E}'_2 + \dot{E}'_{\sigma 2} = \dot{I}'_2 r_2 + \dot{U}'_2$, где $\dot{E}'_{\sigma 2} = -j\dot{I}'_2 x'_2$.

IV. *Процессы в первичной обмотке.* Из уравнения (1.13) следует, что намагничивающий ток равен: $\dot{I}_\mu = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$, откуда определяется ток в первичной обмотке:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_\mu + (-\dot{I}'_2),$$

и строится вектор этого тока. После построения вектора тока \dot{I}_1 можно построить вектор напряжения сети согласно уравнению $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + jx_1 \dot{I}_1$.

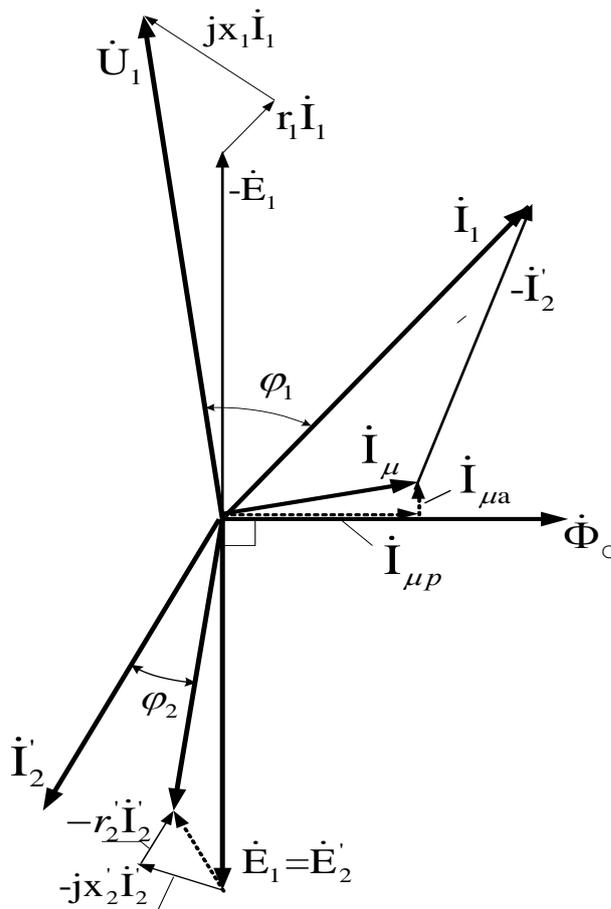


Рис. 1.5. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

1.3. Опытное определение параметров схемы замещения трансформатора

Для определения сопротивлений схемы замещения проводятся два базовых опыта: опыт холостого хода (ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ).

Опыт холостого хода. Холостой ход трансформатора – это режим, при котором к одной из обмоток приложено напряжение сети, а остальные обмотки разомкнуты. На рисунке 1.6 показана схема опыта ХХ трехфазного трансформатора. Все физические величины и параметры в режиме ХХ принято обозначать индексом «0», например, U_0 , I_0 , z_0 и т.д. Следует заметить, что все сопротивления схемы замещения определяются на фазу трансформатора, поэтому при обработке результатов эксперимента измеренные линейные величины должны быть преобразованы в фазные значения.

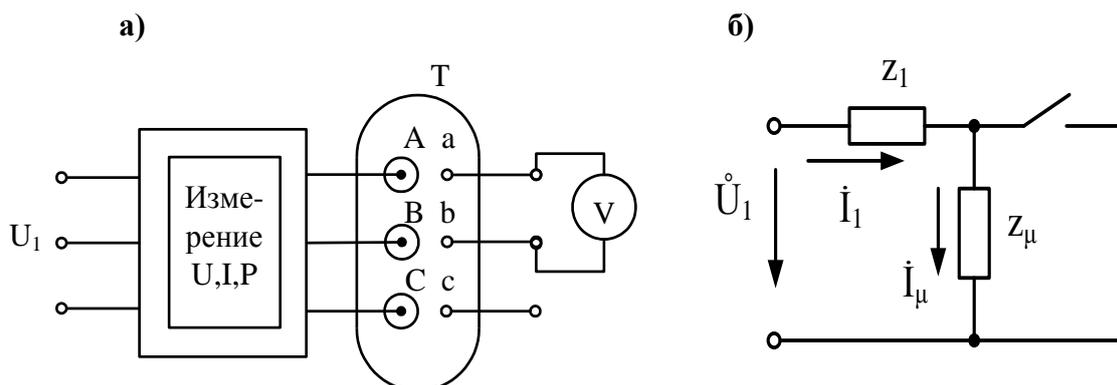


Рис. 1.6. Опыт ХХ трехфазного трансформатора:

- а) схема включения трехфазного трансформатора в опыте ХХ;
б) схема замещения трансформатора в режиме ХХ

По результатам измерений рассчитывают:

– полное сопротивление трансформатора в режиме ХХ:

$$z_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}},$$

– активное сопротивление трансформатора в режиме ХХ:

$$r_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10}^2},$$

– индуктивное сопротивление трансформатора в режиме ХХ:

$$x_{10} = \sqrt{z_{10}^2 - r_{10}^2}.$$

Согласно рисунку 1.6 (б) сопротивление трансформатора в режиме холостого хода представляет собой сумму двух сопротивлений:

$$z_0 = z_1 + z_\mu, \quad r_0 = r_1 + r_\mu, \quad x_0 = x_1 + x_\mu.$$

Но так как в силу магнитных процессов, протекающих в силовых трансформаторах, $z_\mu \gg z_1$, то значением z_1 часто пренебрегают и принимают $z_0 \approx z_\mu$. Это означает, что опытом ХХ определяют сопротивления поперечной цепи схемы замещения трансформатора.

По данным опыта ХХ также строится характеристика холостого хода: $U_0 = f(I_0)$ при $f = \text{const}$ и определяется коэффициент трансформации: $k_{\text{тр}} = U_2 / U_1$.

В промышленной эксплуатации трансформатора опыт ХХ проводят:

- при испытании магнитопровода;
- при испытании трансформатора с запаянными отводами без бака;
- при приемо-сдаточных испытаниях.

Опыт короткого замыкания. Опыт короткого замыкания называют испытание, при котором одну из обмоток трансформатора замыкают накоротко, а другую питают от источника переменного тока при номинальной частоте и при напряжении такой величины, когда токи в обмотках не превышают номинальных значений. На рисунке 1.7 показана схема опыта КЗ трехфазного трансформатора. Все физические величины и параметры в опыте КЗ обозначаются индексом «к», например, U_k, I_k, z_k .

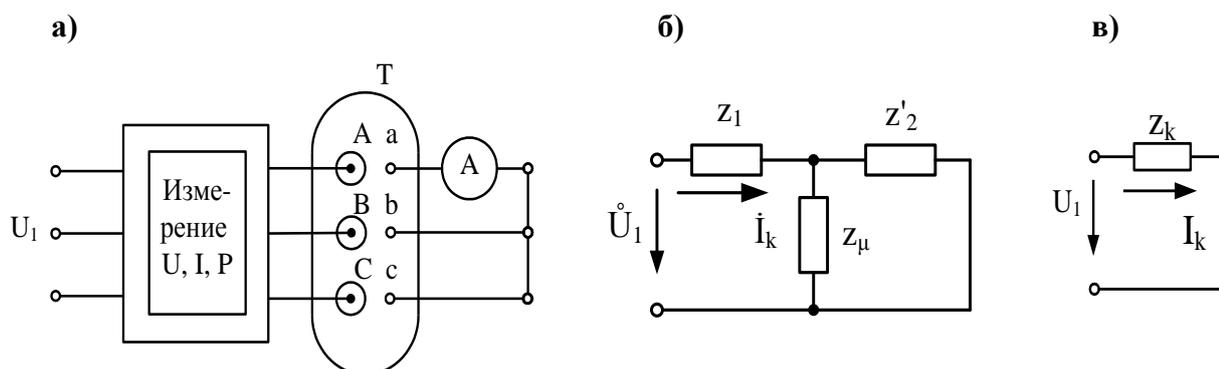


Рис. 1.7. Опыт КЗ трехфазного трансформатора:

- а) схема включения трехфазного трансформатора в опыте КЗ;
 б) полная схема замещения в опыте КЗ;
 в) упрощенная схема замещения в опыте КЗ

По результатам измерений рассчитывают:

– полное сопротивление трансформатора в режиме КЗ:

$$z_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}},$$

– активное сопротивление трансформатора в режиме КЗ:

$$r_{1k} = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2},$$

– индуктивное сопротивление трансформатора в режиме КЗ:

$$x_{1k} = \sqrt{z_{1k}^2 - r_{1k}^2}.$$

Так как в этом опыте напряжение на первичной обмотке значительно ниже номинального, то магнитная система трансформатора не насыщена, и с высокой точностью можно принять $z_{\mu} \gg z_1 + z_2'$. Это дает возможность считать $z_{\mu} \approx \infty$ и принять упрощенную схему замещения (рис. 1.7 (в)), согласно которой:

$$z_k \approx z_1 + z_2'; \quad r_k \approx r_1 + r_2'; \quad x_k \approx x_1 + x_2'.$$

Таким образом, опыт КЗ позволяет определить сопротивление продольной цепи схемы замещения трансформатора. Разделить z_k на составляющие z_1 и z_2' довольно трудно. Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая, что $z_1 = z_2'$. Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты.

Напряжение, которое нужно подвести при опыте КЗ к одной из обмоток, чтобы в ней установился номинальный ток, называют напряжением КЗ, и согласно схеме замещения (рис. 1.7 (в)) оно равно:

$$U_K = I_H z_K. \quad (1.14)$$

Напряжение короткого замыкания (U_K) является одним из параметров трансформатора и показывает, какая часть напряжения, поступающего на трансформатор, теряется на самом трансформаторе при номинальном токе нагрузки.

В паспорте трансформатора напряжение КЗ указывается либо в процентах от номинального напряжения питаемой обмотки, либо в относительных единицах:

$$U_{K^*} = \frac{U_K}{U_H} = \frac{I_H z_K}{U_H} = \frac{z_K}{z_H} = z_{K^*}. \quad (1.15)$$

В приведенной выше формуле используются только фазные значения напряжения и тока.

Так как в силовых трансформаторах $z_0 \gg z_1 + z'_2$, то в практических расчетах часто принимают $z_0 = \infty$, что приводит к упрощенной схеме замещения (рис. 1.8), согласно которой трансформатор эквивалентен сопротивлению:

$$z_K = r_K + jx_K.$$

То есть энергосистемой трансформатор воспринимается как активно-индуктивное сопротивление – Z_K , которое называют *сопротивлением короткого замыкания* трансформатора. Силовые трансформаторы выполняются с сопротивлением КЗ в относительных единицах в пределах $z_{K^*} = 0,04 \div 0,15$.

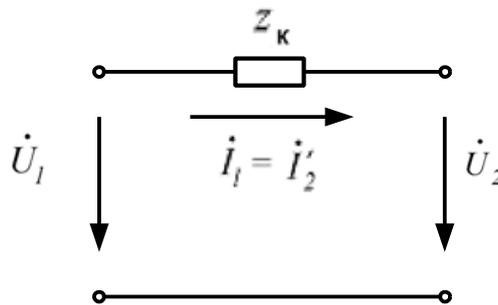


Рис. 1.8. Упрощенная схема замещения трансформатора

Следует заметить, что в относительных единицах напряжение КЗ равно сопротивлению КЗ:

$$U_{K^*} = \frac{U_K}{U_H} = \frac{z_K I_H}{U_H} = \frac{z_K}{z_H} = z_{K^*}. \quad (1.16)$$

Величина U_K часто указывается в процентах:

$$U_{K\%} = \frac{U_K}{U_H} 100 = 100 \cdot U_{K^*} = 100 \cdot z_{K^*}. \quad (1.17)$$

Напряжение КЗ относится к ряду важнейших параметров трансформатора, например, этот параметр существенно влияет на величину токов короткого замыкания в энергосистемах и в системах электроснабжения. Покажем это на следующем примере.

Пусть к шинам с напряжением $U_H = \text{const}$ подключен трансформатор с сопротивлением z_K (рис. 1.9).

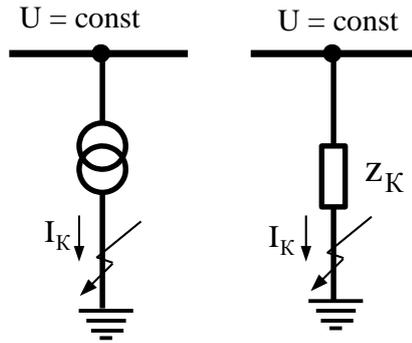


Рис. 1.9. К вопросу о влиянии U_K на ток КЗ за трансформатором

Тогда при коротком замыкании за трансформатором ток КЗ будет определяться выражением:

$$I_K = \frac{U_H}{Z_K},$$

или в относительных единицах:

$$I_{K*} = \frac{1}{Z_{K*}}.$$

Если трансформатор имеет $z_{K*} = 0,04$, то ток КЗ за трансформатором в относительных единицах будет $I_{K*} = 25$, а в именованных единицах $I_K = 25I_{НОМ}$, а при $z_{K*} = 0,10$ ток КЗ будет значительно меньше $I_{K*} = 10$ или $I_K = 10I_{НОМ}$. Этот пример показывает, насколько существенно влияет напряжение КЗ на условия работы энергосистем.

В промышленных условиях данные опыта короткого замыкания используются:

- для определения превышения температур масла и обмоток при испытании на нагрев;
- для определения КПД трансформатора;
- для определения возможности параллельной работы данного трансформатора с другими;
- для расчета изменения вторичного напряжения трансформатора при нагрузке.

Изменение напряжения трансформатора – это арифметическая разность между вторичными напряжениями трансформатора при холостом ходе и при номинальном токе нагрузки, когда первичное напряжение постоянно и равно номинальному значению при номинальной частоте.

Изменение напряжения может быть определено по векторной диаграмме трансформатора и определяется следующей аналитической формулой:

$$\Delta U = k_{НГ} (U_{к.а\%} \cos \varphi_2 + U_{к.р\%} \sin \varphi_2) + \frac{k_{НГ}^2}{200} (U_{к.р\%} \cos \varphi_2 - U_{к.а\%} \sin \varphi_2), \quad (1.18)$$

где $U_{к.а\%} = \frac{P_K}{S_{НОМ}} 100$ – активная составляющая напряжения КЗ, %;

$U_{к.р\%} = \sqrt{U_{к\%}^2 - U_{к.а\%}^2}$ – реактивная составляющая напряжения КЗ, %;

$k_{НГ} = 100 \cdot I_{наг} / I_H$ – коэффициент нагрузки трансформатора, %.

Отметим, что в формуле (1.18) второе слагаемое незначительно по сравнению с первым, и в практических расчетах им обычно пренебрегают, что дает упрощенную формулу:

$$\Delta U \approx k_{НГ} (U_{к.а\%} \cos \varphi_2 + U_{к.р\%} \sin \varphi_2). \quad (1.19)$$

Потери мощности в трансформаторе. Активные и реактивные потери мощности в трансформаторе можно определить по схеме замещения в соответствии с известными формулами:

$$\Delta P = m(I_{\phi})^2 r, \quad \Delta Q = m(I_{\phi})^2 x,$$

где m – число фаз, I_{ϕ} – фазный ток. И наоборот, из этих соотношений по известным величинам ΔP и ΔQ можно определить соответствующие этим потерям сопротивления схемы замещения.

Потери мощности в трансформаторе разделяют на постоянные и переменные.

Постоянные потери мощности трансформатора не зависят от его нагрузки, а определяются только напряжением питающей сети. Этот факт объясняется следующим образом. Для питающей обмотки справедливо уравнение:

$$\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}_1 r_1,$$

в режиме холостого хода $I_1 \approx 0$, поэтому $U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot \Phi_C f w_1$, это означает, что магнитный поток в сердечнике пропорционален напряжению питающей сети $U_1 \sim \Phi_C$. Поскольку в нормальном режиме $U_1 = \text{const}$, то и $\Phi_C = \text{const}$, и поэтому потери в сердечнике постоянны, т. е. не зависят от нагрузки трансформатора. Они могут быть определены по формуле:

$$P_X \approx P_{ct} = U_{ном} I_0 \cos(\varphi_0), \quad (1.20)$$

где P_X – потери в магнитопроводе (указывается в паспорте), кВт; $U_{ном}$ – номинальное (фазное) напряжение первичной обмотки, кВ; I_0 – ток холостого хода (указывается в паспорте), А; $\cos(\varphi_0)$ – коэффициент мощности в режиме ХХ.

Переменные потери зависят от нагрузки трансформатора – это электрические потери в обмотках, и они определяются по формуле:

$$\Delta P_{эл} = \left(\frac{I_2}{I_{2ном}} \right)^2 P_K = k_{нг}^2 P_K, \quad (1.21)$$

где P_K – номинальные потери КЗ (указывается в паспорте), кВт; I_2 – фактический ток нагрузки, А; $I_{2ном}$ – номинальный ток вторичной обмотки, А.

Коэффициент полезного действия (КПД). Потери в трансформаторе определяют его коэффициент полезного действия, значение которого определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \left(1 - \frac{P_X + k_{нг}^2 P_K}{k_{нг} S_H \cos \varphi_2 + P_X + k_{нг}^2 P_K} \right), \quad (1.22)$$

где $\Delta P = P_X + \Delta P_{эл}$ – полная мощность активных потерь, кВт; P_X – потери холостого хода (из паспорта), кВт; P_K – мощность короткого замыкания (из паспорта), кВт; S_H – номинальная мощность, кВ·А.

В эксплуатационной практике большое значение имеет нагрузка, при которой КПД трансформатора становится максимальным. Дифференцируя формулу (1.22), из условия $d\eta/dk_{нг} = 0$ находится соответствующая максимальному КПД трансформатора нагрузка:

$$\beta = \sqrt{\frac{P_X}{P_K}}. \quad (1.23)$$

Так как в энергосистемах трансформаторы в подавляющем большинстве случаев работают параллельно и нормально допускают перегрузку до 1,4 раза, то их изготавливают с $\beta = 0,5 \div 0,7$, что обеспечивает для двухтрансформаторных подстанций максимальный КПД в рабочих режимах.

ГЛАВА 2. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. Общие сведения о трехфазных трансформаторах

Трехфазный трансформатор представляет собой соединение трех однофазных трансформаторов, поэтому вся теория, рассмотренная для однофазного трансформатора, относится и к трехфазному трансформатору, но применительно к одной фазе.

Основными элементами трансформатора являются: трехфазная магнитная система и трехфазные обмотки. Эти элементы называются *активными*.

Магнитная система трансформатора предназначена для локализации и усиления главного (рабочего) магнитного поля трансформатора. Магнитопровод собирается из пластин электротехнической стали или другого ферромагнитного материала и в собранном виде совместно со всеми узлами и деталями, служащими для скрепления отдельных частей в единую конструкцию, называется *остовом трансформатора*.

Часть магнитной системы, на которой располагаются обмотки трансформатора, называется *стержнем*, а остальная часть магнитной системы служит для замыкания магнитной цепи и называется *ярмом*.

По принципу компоновки магнитной системы трехфазные трансформаторы делятся на два вида:

1. Трансформаторы с независимой магнитной системой (групповые). В этих трансформаторах каждая фаза выполняется на отдельном магнитопроводе (рис. 2.1).

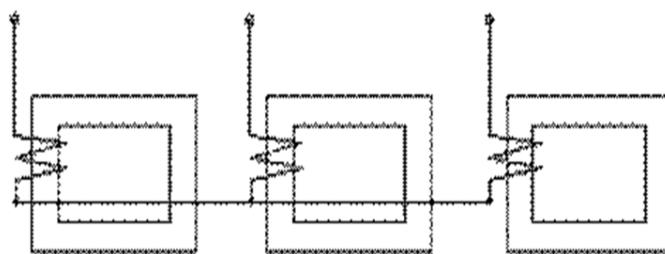


Рис. 2.1. Схема магнитопровода группового трехфазного трансформатора

2. Трансформаторы с общей для всех фаз магнитной системой. Такие трансформаторы имеют несколько вариантов выполнения магнитопроводов: трехстержневые, броневые, бронестержневые (пятистержневые).

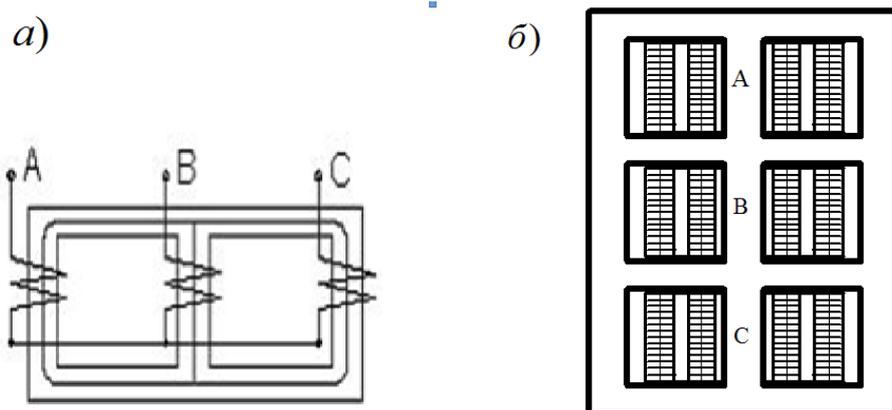


Рис. 2.2. Схемы магнитопровода трехфазного трансформатора:
а) стержневого; б) броневый

В зависимости от пространственного расположения стержней выделяют следующие типы магнитных систем:

1) *плоская магнитная система* – магнитная система, в которой продольные оси всех стержней и ярм расположены в одной плоскости;

2) *пространственная магнитная система* – магнитная система, в которой продольные оси стержней или ярм, или стержней и ярм расположены в разных плоскостях;

3) *симметричная магнитная система* – магнитная система, в которой все стержни имеют одинаковую форму, конструкцию и размеры, а взаимное расположение любого стержня по отношению ко всем ярмам одинаково для всех стержней;

4) *несимметричная магнитная система* – магнитная система, в которой отдельные стержни могут отличаться от других стержней по форме, конструкции или размерам либо взаимное расположение какого-либо стержня по отношению к другим стержням или ярмам может отличаться от расположения любого другого стержня.

Обмотки трехфазных трансформаторов. Трехфазная обмотка состоит из трех фазных обмоток, для которых предусмотрены следующие способы соединения: Y – звезда, D – треугольник, Z – зигзаг (рис. 2.3). Перед тем, как собрать фазные обмотки в одну из указанных схем, их маркируют, т. е. определяют их начала и концы. Для трехфазных трансформаторов принято следующее стандартное обозначение вводов:

- высшее напряжение (ВН): начала – A, B, C , концы – X, Y, Z ;
- среднее напряжение (СН): начала – A_m, B_m, C_m , концы – X_m, Y_m, Z_m ;
- низшее напряжение (НН): начала – a, b, c , концы – x, y, z ;
- нулевые точки – n .

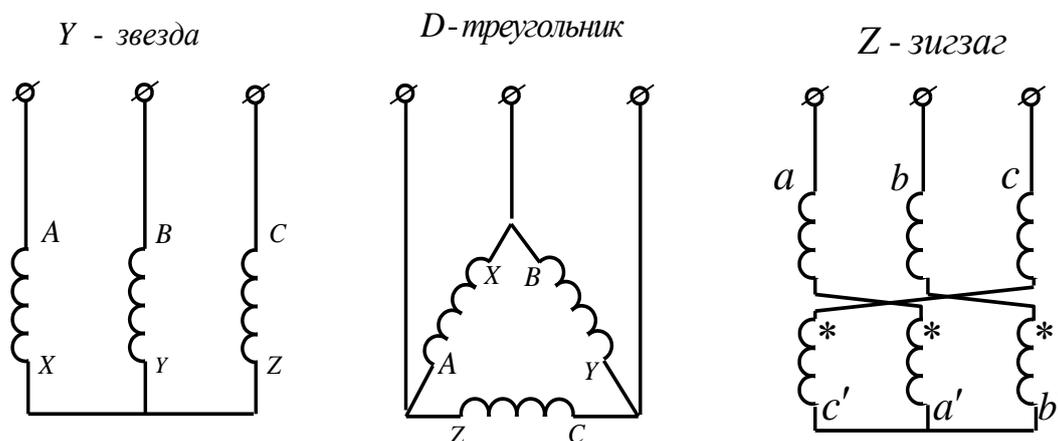


Рис. 2.3. Стандартные схемы соединения трехфазных обмоток трансформатора

Обмотка является важным элементом трансформатора. *Обмоткой* называют комплекс катушек всех фаз одного напряжения. Если необходимо рассмотреть процессы в отдельной фазе, то говорят о *фазной обмотке*.

На основе понятия об обмотке трансформаторы классифицируются следующим образом:

1) по количеству и конструкции обмоток: *двухобмоточные, трехобмоточные, с расщепленной обмоткой*;

2) по схемам соединения обмоток:

- Y – звезда (с изолированной или заземленной нейтралью),
- D – треугольник,
- Z – зигзаг;

3) по способу передачи энергии:

- *трансформаторная связь обмоток* (обмотки в трансформаторе электрически не связаны – передача энергии происходит только электромагнитным путем),
- *автотрансформаторная связь обмоток* (помимо магнитной связи обмотки также связаны электрически, а передача энергии с одного уровня напряжения на другой происходит двумя путями: электромагнитным и электрическим).

2.2. Группы соединений обмоток трансформаторов

Преамбула. Понятие о группах соединений обмоток трансформаторов имеет принципиальное значение, т. к. при переходе через трансформатор напряжение на его выходе может отличаться по фазе от напряжения на входе. Этот фазовый сдвиг напряжений определяется номером группы соединений.

В однофазном трансформаторе напряжения первичной и вторичной обмоток могут либо совпадать по фазе, либо быть сдвинутыми на 180° . Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по нескольким схемам: Y, D, Z, и при этом каждая из перечисленных схем может быть собрана различными способами. В результате этого в трехфазных трансформаторах можно получить 12 вариантов фазовых сдвигов напряжений с градацией в 30° . Для того чтобы правильно собрать любую многофазную схему, катушки всех фаз должны быть предварительно промаркированы, т. е. определены их начала и концы.

Маркировка катушек – это техническая процедура по определению их начал и концов. Понятие «начала и концы катушек» имеет смысл только для индуктивно связанных катушек, т. е. катушек, пронизанных общим магнитным потоком. Общий магнитный поток индуцирует в катушках ЭДС, и зажимы приобретают потенциалы «+» или «-», и поэтому маркировка катушек сводится к определению зажимов, имеющих одинаковые знаки потенциалов.

Если направление намотки катушек известно, их маркировка не вызывает труда, в противном случае катушки маркируют с помощью специальных опытов. Суть этих опытов в следующем. У одной из катушек вводы обозначают произвольно: «н» – начало, «к» – конец, у остальных катушек начала и концы должны быть определены экспериментально.

Одна из возможных схем маркировки катушек изображена на рисунке 2.4:

Шаг 1. Перед маркировкой для катушки 1 назначаем начало – «н» и конец – «к».

Шаг 2. Произвольно обозначаем начало и конец на катушке 2, после чего проверяем выбранную маркировку этой катушки.

Шаг 3. Включаем катушки сначала согласно, потом встречно, и если при согласном включении оказалось $U_2 > U_1$, значит маркировка катушки 2 выбрана правильно, если в опыте получилось $U_2 < U_1$ – маркировку вводов этой катушки меняем на обратное.

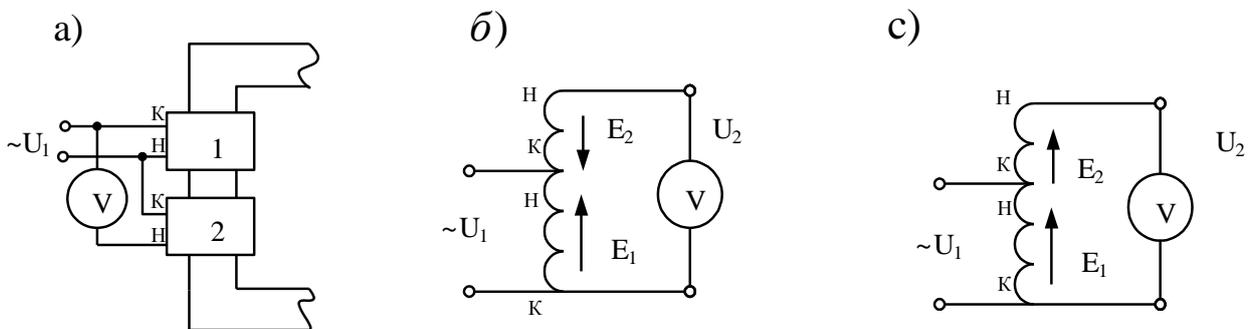


Рис. 2.4. Пример схемы для маркировки катушек (а);

б) – встречное включение катушек;

в) – согласное включение катушек

Номер группы обмоток трансформатора определяется величиной угла между одноименными линейными векторами ЭДС обмоток высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений. Для определения номера группы этот угол делят на 30° . Например, обозначение Y/D – 3 соответствует включению обмоток ВН в «Y», обмоток НН в «D», и трансформация с высшего напряжения на низшее осуществляется с поворотом фазы линейного напряжения на $3 \cdot 30^\circ = 90^\circ$. Номер группы соединения обозначают числами от 0 до 11.

При эксплуатации трансформаторов возникает три задачи, связанные с обмотками и схемами их соединения:

- 1) определение номера группы собранной схемы с известной маркировкой обмоток;
- 2) разработка схемы соединения обмоток трансформатора с заданным номером;
- 3) проверка (или определение) номера группы собранной схемы.

Задачи 1 и 2 решаются с помощью векторных диаграмм, задача 3 решается экспериментально.

Пример определения номера группы по заданной схеме дан ниже, процедура определения номера группы состоит из 3-х этапов.

Этап I. Построение векторов фазных ЭДС. Все катушки, расположенные на одном стержне, сцеплены с единым магнитным потоком стержня, и в них индуцируются ЭДС одного направления. Например, примем, что ЭДС направлены от конца к началу. На схеме обмотки этот факт изображают стрелками (рис. 2.5 (а)). А так как ЭДС в фазах имеют временной сдвиг на 120° относительно друг друга, то на временной диаграмме они изображаются векторами так, как представлено на рисунке 2.5 (б). Обратите внимание, что на рисунках 2.5 (б, г) изображены пока не звезды ЭДС, это только заготовка для построения векторных диаграмм.

Этап II. Построение векторных диаграмм ЭДС для обмоток ВН и НН. Векторные диаграммы строятся на основании схем соединения обмоток, т. е. учитывается следующий физический факт: зажимы электрически соединенных катушек имеют единый потенциал, а это значит, что вектора ЭДС данных катушек на диаграмме должны быть сведены в одну точку.

В обмотке ВН электрически соединены концы X, Y, Z, поэтому вектора E_A, E_B, E_C образовали звезду (рис. 2.5 (в)). (Следует иметь в виду, что перенос векторов из одной диаграммы в другую производится параллельно).

В обмотке НН электрически соединены вводы a-z, b-x, c-y, поэтому параллельно переносим вектора из рисунка 2.5 (г) на рисунок 2.5 (д) так, чтобы равнопотенциальные точки векторов совпадали. В результате получаем треугольник ЭДС.

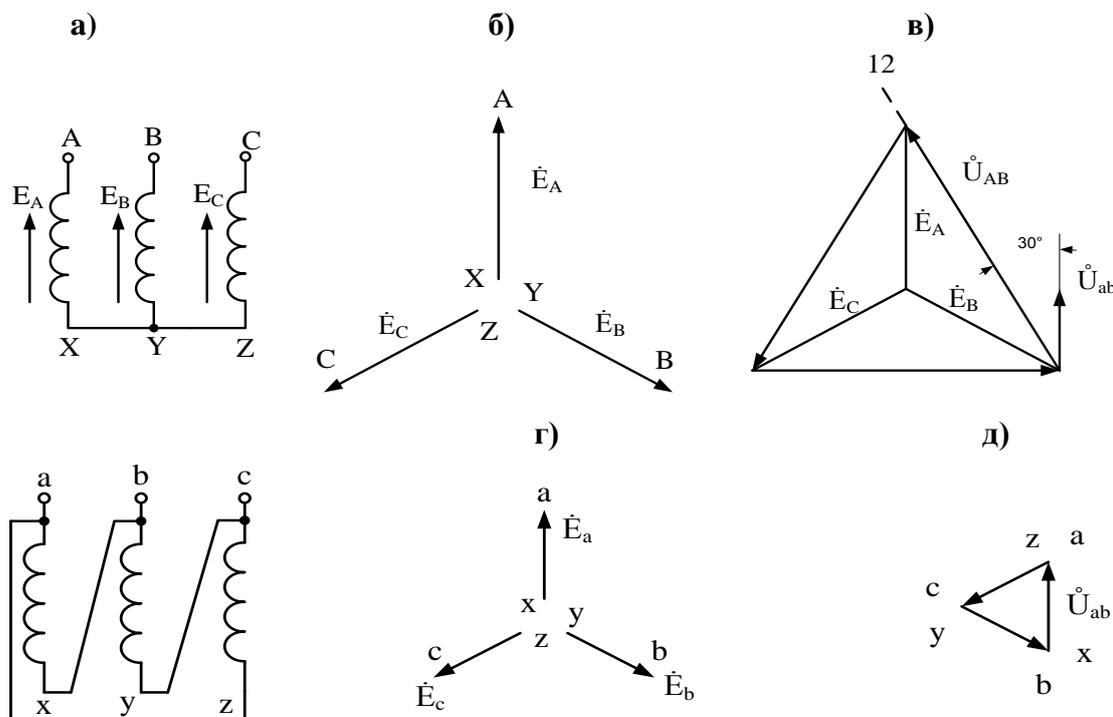


Рис. 2.5. Схемы и диаграммы для определения номера группы

Этап III. Определение номера группы. По направлению любого линейного вектора ВН, например \dot{U}_{AB} , ставится цифра 12 (будем считать, что это минутная стрелка циферблата), параллельно переносится одноименный вектор низшего напряжения \dot{U}_{ab} (часовая стрелка), часы показывают 1 час, что дает номер группы – 1. Соответственно, полное обозначение схемы соединения обмоток трансформатора – Y/D – 1.

Установленные в ГОСТ Р 52719 схемы и группы соединений обмоток трансформаторов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Схемы и группы соединений обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				Y/Y _н – 0
				Y _н /Y – 0
				Y/D – 11
				Y _н /D – 11
				Y/Z _н – 11
				D/Y _н – 11
				D/D – 0

Таблица 2.2

Схема и группа соединения обмоток однофазного двухобмоточного трансформатора

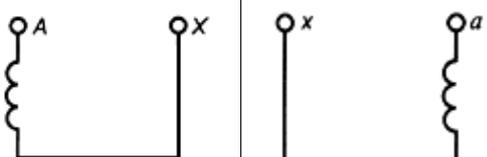
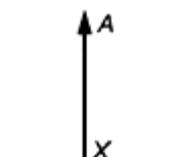
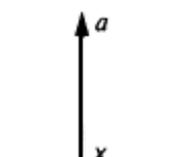
Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				1/1 – 0

Таблица 2.3

Схемы и группы соединений обмоток трехфазных трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов

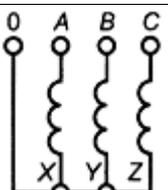
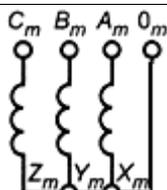
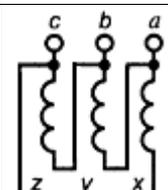
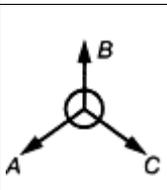
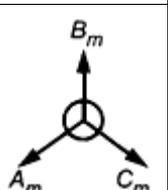
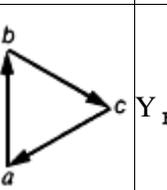
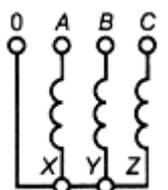
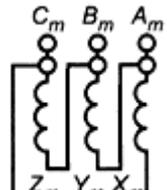
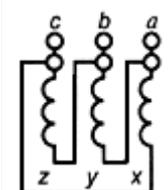
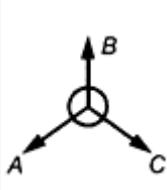
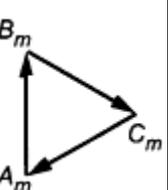
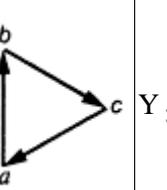
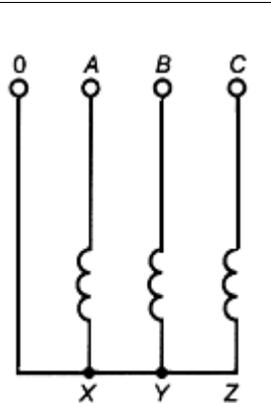
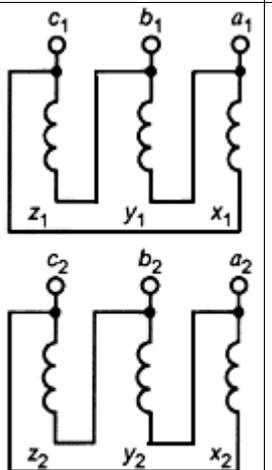
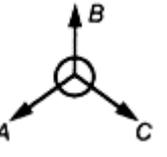
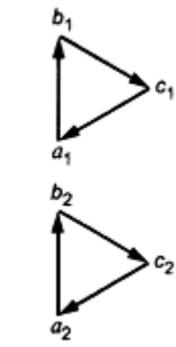
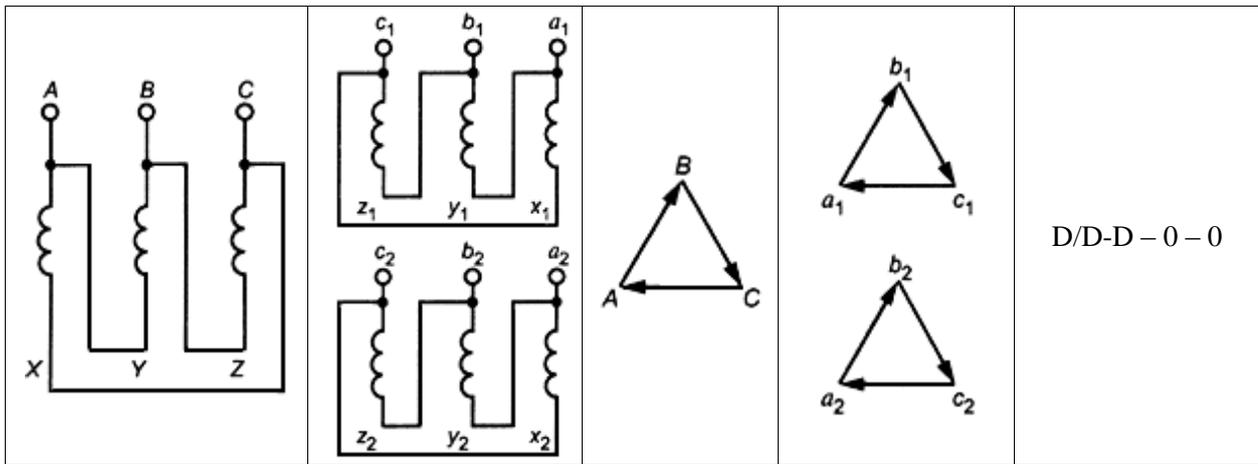
Схема соединения обмоток			Диаграмма векторов напряжения холостого хода			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						$Y_H / Y_H / D - 0 - 11$
						$Y_H / D / D - 11 - 11$

Таблица 2.4

Схемы и группы соединений обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов с расщепленной обмоткой НН

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов напряжения холостого хода		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y_H / D - D - 11 - 11$



2.3. Типы трехфазных трансформаторов. Основные расчетные соотношения

2.3.1. Г-образная схема замещения

В основу расчетных и аналитических работ, связанных с трансформатором, положены схемы замещения. Для объяснения электромагнитных процессов и физического толкования параметров трансформатора используют Т-образную схему замещения, т. к. в ней каждый параметр непосредственно связан с определенным физическим процессом. Однако для многих инженерных расчетов эта схема неудобна по той причине, что в ней имеются две параллельные ветви – цепь намагничивания и цепь вторичной обмотки, в результате чего напряжение U_{12} на параллельной цепи изменяется при изменении нагрузки.

Более удобной в этом отношении является схема замещения, в которой зажимы параллельной цепи вынесены на зажимы питания U_1 , такую схему называют «Г-образная схема замещения» (рис. 2.6). Так как в этой схеме намагничивающий контур вынесен на сетевые зажимы, то цепь намагничивания и главную цепь можно рассчитывать независимо друг от друга.

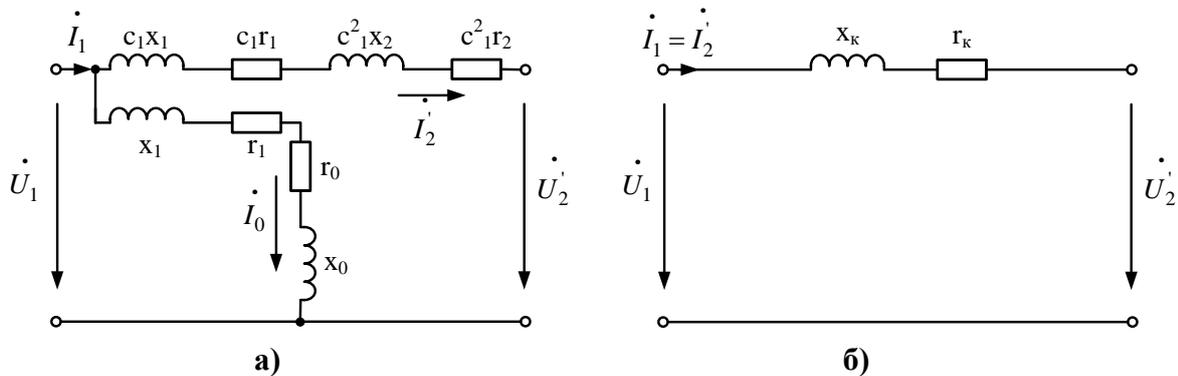


Рис. 2.6. Г-образная схема замещения одной фазы двухобмоточного трансформатора:
а) – полная, б) – упрощенная

Для преобразования Т-образной схемы в Г-образную схему вводится поправочный комплексный коэффициент:

$$c = 1 + \frac{z_1}{z_0}, \quad (2.1)$$

а параметры Г-образной схемы определяются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} z'' &= cz_1 + c^2 z_2', \\ I_2'' &= c_1 I_2'. \end{aligned} \quad (2.2)$$

В практических расчетах часто принимают $z_0 = \infty$, что приводит к упрощенной схеме (рис. 2.6 (б)).

2.3.2. Двухобмоточный трансформатор

На рисунке 2.7 показано условное изображение двухобмоточного трансформатора, в обмотках может быть указана схема соединения (звезда, звезда с нулем, треугольник, зигзаг), а также соединение нейтрали (изолированная и заземленная).

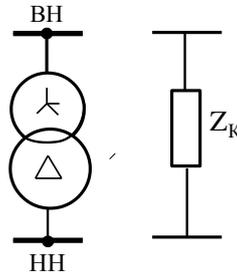


Рис. 2.7. Изображение трансформатора в электрических схемах и его упрощенная схема замещения

Параметры трансформатора определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания. Данные опытов указываются в паспортных данных трансформатора:

- P_x – потери активной мощности в режиме холостого хода, в кВт;
- I_x – ток холостого хода, в %.
- P_k – потери активной мощности в режиме короткого замыкания, в кВт;
- U_k – напряжение короткого замыкания, в %.

Также по паспортным данным определяются сопротивления схемы замещения. При этом следует помнить, что сопротивления имеют смысл только для фазы трансформатора и поэтому определяются по его фазным параметрам U_{ϕ} , I_{ϕ} , $P_{k,\phi}$, $P_{x,\phi}$.

Сопротивления трансформатора определяются через параметры одной из обмоток, ниже это сделано для обмотки ВН.

Активное сопротивление короткого замыкания определяется из формулы:

$$P_K = 3P_{K,\phi} = 3r_K I_{1\phi,\text{ном}}^2, \quad (2.3)$$

где $I_{1\phi,\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{B,\text{ном}}}$ – номинальный фазный ток обмотки ВН.

Отсюда получим:

$$r_K = \frac{P_K U_{B,\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2}. \quad (2.4)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания определяется по значению индуктивной составляющей падения напряжения короткого замыкания:

$$U_{K,p} = X_K I_{1\phi,\text{ном}}.$$

Но обычно в паспорте трансформатора указывается относительное значение напряжения КЗ:

$$U_{K,p}, \% = \frac{U_{K,p}}{U_{B,\phi,\text{ном}}} 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot X_K I_{1\phi,\text{ном}}}{U_{B,\text{ном}}} 100,$$

откуда следует формула для реактивного сопротивления:

$$X_K = \frac{U_{K,p\%} \cdot U_{B,\text{ном}}}{100\sqrt{3} \cdot I_{1\phi,\text{ном}}}. \quad (2.5)$$

Умножив и разделив последнее выражение на $U_{В.НОМ}$, получим:

$$X_K = \frac{U_{К.р\%} \cdot U_{В.НОМ}}{100\sqrt{3} \cdot I_{ф.НОМ}} \cdot \frac{U_{В.НОМ}}{U_{В.НОМ}} = \frac{U_{К.р\%} \cdot U_{В.НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}. \quad (2.6)$$

В современных трансформаторах $U_{К.р} \gg U_{К.а}$, и поэтому в практических расчетах принимают $U_{К.р} \approx U_{К}$, а формула для расчета индуктивного сопротивления трансформатора имеет вид:

$$X_K = \frac{U_{К\%} \cdot U_{В.НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}. \quad (2.7)$$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_K = r_K + jX_K. \quad (2.8)$$

Часто в литературе это сопротивление называют «сопротивлением трансформатора» и обозначают z_T , этим подчеркивается тот факт, что трансформатор энергосистемой воспринимается как сопротивление величиной z_K .

2.3.3. Трехобмоточный трансформатор

Обозначение трехобмоточного трансформатора на схемах приведено на рисунке 2.8. В этом трансформаторе имеются обмотки высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжений.

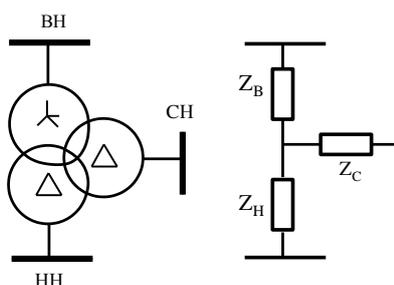


Рис. 2.8. Условное обозначение трехобмоточного трансформатора и его упрощенная схема замещения

Мощности обмоток высшего, среднего и низшего напряжений указываются в процентах от номинальной мощности трансформатора: 100/100/100, 100/100/67, 100/67/100, 100/67/67. За номинальную мощность трансформатора принимается наибольшая из мощностей обмоток. Суммарная нагрузка обмоток СН и НН не должна превышать номинальную мощность трансформатора.

Обмотки трехобмоточных трансформаторов размещены на стержнях концентрически в следующем порядке: обмотка ВН — снаружи; обмотка НН — внутри, у стержня; обмотка СН — между обмотками высшего и низшего напряжений. При таком расположении напряжение КЗ между обмотками высшего и среднего напряжений имеет минимальное значение, что позволяет передавать мощность в сеть среднего напряжения с минимальными потерями. С другой стороны, напряжение КЗ между обмотками высшего и низшего напряжений относительно велико, что способствует ограничению тока КЗ в сети низшего напряжения.

В основе исследования физических процессов лежит классическая Т-образная схема замещения, а для практических расчетов обычно используется Г-образная схема, в данном случае в виде трехлучевой звезды (рис. 2.9).

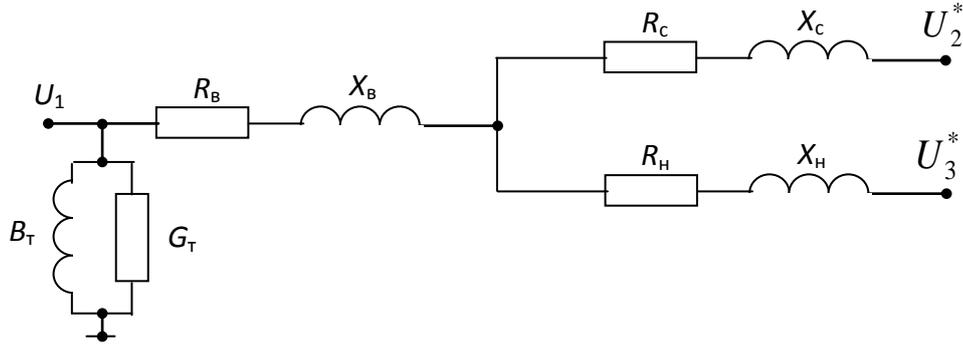


Рис. 2.9. Г-образная схема замещения трехобмоточного трансформатора

Параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора определяются по опыту холостого хода и трем опытам короткого замыкания.

По данным опыта ХХ определяются активное и реактивное сопротивления цепи намагничивания (смотри формулы для двухобмоточного трансформатора).

Опыты КЗ проводятся для каждой пары обмоток, из чего определяются следующие данные:

- $U_{кВН}$, $\Delta P_{кВН}$ (питание со стороны обмотки ВН, закорочена обмотка НН);
- $U_{кВС}$, $\Delta P_{кВС}$ (питание со стороны обмотки ВН, закорочена обмотка СН);
- $U_{кСН}$, $\Delta P_{кСН}$ (питание со стороны обмотки СН, закорочена обмотка НН).

Согласно схеме замещения результаты опыта можно записать так:

$$\begin{cases} U_{кВН} = U_{кВ} + U_{кН}; \\ U_{кВС} = U_{кВ} + U_{кС}; \\ U_{кСН} = U_{кС} + U_{кН}. \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta P_{кВН} = \Delta P_{кВ} + \Delta P_{кН}; \\ \Delta P_{кВС} = \Delta P_{кВ} + \Delta P_{кС}; \\ \Delta P_{кСН} = \Delta P_{кС} + \Delta P_{кН}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Из первой системы уравнений определяются напряжения КЗ каждой обмотки:

$$\begin{aligned} U_{кВ} &= 0,5 \cdot (U_{кВН} + U_{кВС} - U_{кСН}); \\ U_{кС} &= 0,5 \cdot (U_{кВС} + U_{кСН} - U_{кВН}); \\ U_{кН} &= 0,5 \cdot (U_{кВН} + U_{кСН} - U_{кВС}). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Одно из значений напряжений КЗ значительно меньше двух других. Обычно это $U_{кС}$ или $U_{кСН}$. Это объясняется тем, что магнитное поле обмотки СН, которая находится между двумя другими обмотками, в значительной степени компенсируется магнитными полями крайних обмоток. В практических расчетах величина $U_{к}$ этой обмотки принимается равной нулю.

Индуктивные сопротивления обмоток трансформатора, приведенные к обмотке ВН, рассчитываются по той же формуле, что и для двухобмоточного трансформатора:

$$X_B = \frac{U_{кВ} \cdot U_{В,НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}; \quad X_C = \frac{U_{кС} \cdot U_{В,НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}; \quad X_H = \frac{U_{кН} \cdot U_{В,НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}. \quad (2.11)$$

Решение второй системы уравнений дает значения потерь активной мощности в каждой обмотке:

$$\begin{aligned} \Delta P_{кВ} &= 0,5 \cdot (\Delta P_{кВН} + \Delta P_{кВС} - \Delta P_{кСН}); \\ \Delta P_{кС} &= 0,5 \cdot (\Delta P_{кВС} + \Delta P_{кСН} - \Delta P_{кВН}); \\ \Delta P_{кН} &= 0,5 \cdot (\Delta P_{кВН} + \Delta P_{кСН} - \Delta P_{кВС}). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Активные сопротивления обмоток трансформатора рассчитываются по той же формуле, что и для двухобмоточного трансформатора:

$$r_B = \frac{\Delta P_{к.В} \cdot U_{В.НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}; \quad r_C = \frac{\Delta P_{к.С} \cdot U_{В.НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}; \quad r_H = \frac{\Delta P_{к.Н} \cdot U_{В.НОМ}^2}{S_{НОМ}^2}. \quad (2.13)$$

2.3.4. Трансформаторы с расщепленной обмоткой

Формально этот трансформатор – двухобмоточный. Но у него вторичная обмотка разделена на две одинаковые части, и по этому признаку он имеет свойства трехобмоточного трансформатора.

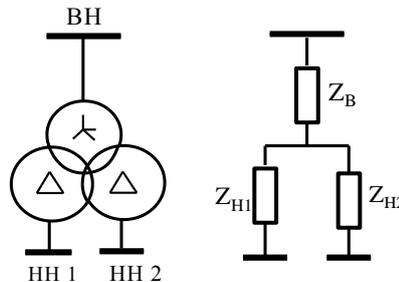


Рис. 2.10. Обозначение трансформатора с расщепленной обмоткой в электрических схемах и его упрощенная схема замещения

В трансформаторе с расщепленной обмоткой обмотка НН выполнена из двух или более одинаковых обмоток, расположенных симметрично по отношению к обмотке ВН. Номинальные напряжения ветвей одинаковы, а их мощности составляют часть номинальной мощности трансформатора и в сумме равны мощности обмотки ВН. В этом состоит отличие трансформаторов с расщепленной обмоткой от трехобмоточных трансформаторов, у которых суммарная мощность обмоток СН и НН всегда больше мощности обмоток ВН. Трансформаторы с расщепленной обмоткой выпускаются при мощности 25 МВ·А и более.

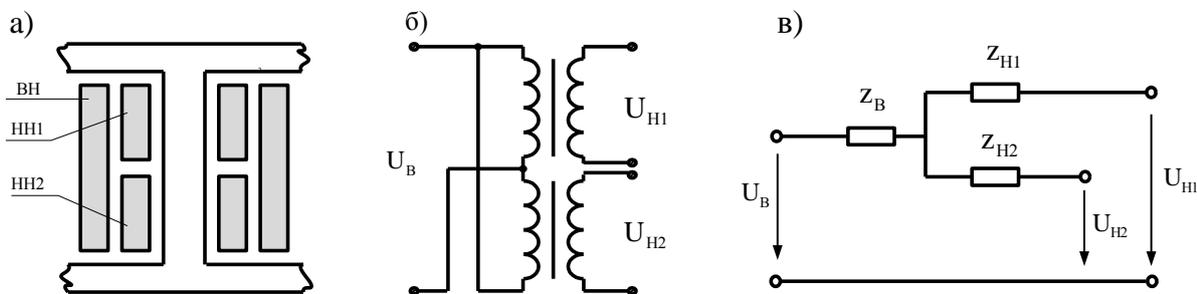


Рис. 2.11. Устройство обмоток трансформатора с расщепленной обмоткой НН на две части (а), схема соединения обмоток (б), схема замещения (в)

Рассмотрим подробнее свойства трансформатора с расщеплением обмотки НН на две части. В таком трансформаторе принципиальное значение имеет расположение обмоток относительно друг друга, т. к. это влияет на величину сопротивлений трансформатора.

В трехфазном трансформаторе расщепленная обмотка НН каждой фазы выполняется из двух одинаковых частей (ветвей), обе части расщепленной обмотки размещены на общем стержне соответствующей фазы – одна над другой – и расположены симметрично по отношению к обмотке ВН (рис. 2.11 (а)).

В однофазных трансформаторах части расщепленной обмотки размещены на разных стержнях.

Каждая ветвь расщепленной обмотки имеет самостоятельные выходы. Допускается любое распределение нагрузки между ветвями расщепленной обмотки, например, при

двух ветвях одна ветвь может быть полностью нагружена, а вторая отключена, или обе ветви нагружены полностью.

Расщепление обмотки низшего напряжения приводит к увеличению сопротивления КЗ между ветвями, что дает возможность эффективно ограничивать ток короткого замыкания на стороне низшего напряжения. Остановимся на этом подробнее.

Сопротивления трансформатора с расщепленной обмоткой и коэффициент расщепления. В основу определения сопротивлений такого трансформатора положена трехлучевая схема замещения, и для трансформатора с расщеплением вводятся новые понятия о сопротивлениях.

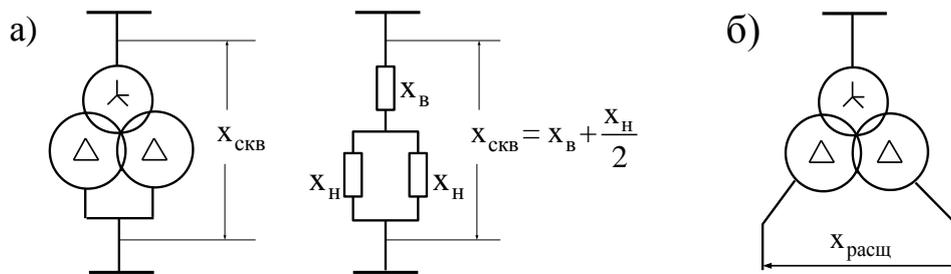


Рис. 2.12. К понятию сопротивлений трансформатора с расщепленной обмоткой

Сквозное сопротивление определяется по данным опыта КЗ при замкнутых коротко обмотках НН (рис. 2.12 (а)). Из приведенной схемы следует, что сквозное сопротивление – это паспортное значение сопротивления трансформатора, равное его значению при отсутствии расщепления. В относительных единицах оно равно:

$$X_{СКВ}^* = X_{Т^*} = U_{к.ВН-НН\%}, \quad (2.14)$$

а в именованных единицах:

$$r_{СКВ} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{В\text{НОМ}}^2}{S_{НОМ}^2} \quad \text{и} \quad X_{СКВ} = \frac{U_k \cdot U_{В\text{НОМ}}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}. \quad (2.15)$$

Коэффициент расщепления характеризует уровень электромагнитной связи между обмотками, его значение определяется расположением обмоток относительно друг друга и отношением:

$$k_{расщ} = \frac{X_{расщ}}{X_{СКВ}}. \quad (2.16)$$

Так как в однофазных трансформаторах части расщепленной обмотки размещены на разных стержнях, то это дает $k_{расщ} = 4$.

Поскольку в трехфазных трансформаторах обе части расщепленной обмотки размещены на общем стержне соответствующей фазы одна над другой, то и $k_{расщ} = 3,5$.

При расщеплении обмотки на две части $k_{расщ} \leq 4$, а при расщеплении обмотки на три части $k_{расщ} \leq 6$.

Индуктивное сопротивление расщепления ($X_{расщ}$) – это сопротивление между выводами двух ветвей расщепленной обмотки. При расщеплении обмотки НН на 2 равные части сопротивления этих обмоток равны:

$$X_{Н1} = X_{Н2} = \frac{X_{расщ}}{2} = \frac{k_{расщ} X_{СКВ}}{2}; \quad (2.17)$$

из схемы замещения (рис. 2.12 (а)) определим индуктивное сопротивление обмотки ВН:

$$X_B = X_{СКВ} - \frac{X_H}{2} = X_{СКВ} - \frac{k_{расщ} X_{СКВ}}{2 \cdot 2} = \left(1 - \frac{k_{расщ}}{4}\right) X_{СКВ}. \quad (2.18)$$

Примечание. При расщеплении обмотки НН на 3 части сопротивление обмотки высшего напряжения будет равно:

$$X_B = X_{\text{СКВ}} - \frac{X_H}{3} = X_{\text{СКВ}} - \frac{k_{\text{расщ}} X_{\text{СКВ}}}{3 \cdot 2} = \left(1 - \frac{k_{\text{расщ}}}{6}\right) X_{\text{СКВ}}. \quad (2.19)$$

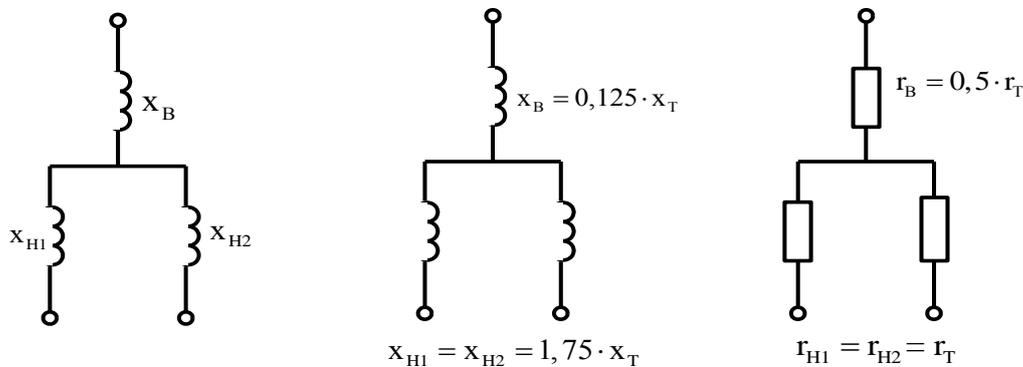


Рис. 2.13. Сопротивления обмоток при расщеплении обмотки НН на 2 части

Сопротивления двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения определяются следующим образом:

– *активные сопротивления* определяются по формулам для трехобмоточного трансформатора и равны:

$$r_B = 0,5 \cdot r_T; \quad r_{H1} = r_{H2} = r_T; \quad (2.20)$$

– *индуктивные сопротивления* находятся по формулам:

$$X_B = \frac{U_{\text{кВ}} U_B^2}{S_{\text{ном}} 100}; \quad X_{H1} = X_{H2} = \frac{U_{\text{кН1}} U_B^2}{S_{\text{ном}} 100}. \quad (2.21)$$

2.3.5. Автотрансформаторы

Автотрансформатор – это электрический аппарат, предназначенный для преобразования уровней напряжения, но в отличие от трансформатора в нем имеются два пути передачи энергии: один путь, как и в трансформаторах, посредством магнитного поля, другой – посредством электрической связи между обмотками.

Обмотки в автотрансформаторе всегда соединены так, что одна обмотка включена последовательно между сетями, соответственно ее называют «последовательной», а вторая обмотка включена параллельно на зажимы одной из сетей, и ее называют «общей». Схемы включения обмоток приведены на рисунке 2.14.

В силу конструктивных условий передача энергии электрическим путем дешевле, чем магнитным, поэтому автотрансформатор с экономической точки зрения выгоднее трансформатора. Особенность механизма передачи мощности приводит к новым определениям.

Проходная мощность – это полная мощность, которая проходит через автотрансформатор, ее определяют на входных $U_1(U_{\text{вх}})$ или выходных $U_2(U_{\text{вых}})$ зажимах. Эта мощность является также *номинальной* мощностью автотрансформатора:

➤ для однофазного автотрансформатора:

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}; \quad (2.22)$$

➤ для трехфазного автотрансформатора:

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{ном}} = \sqrt{3} U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = \sqrt{3} U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}. \quad (2.23)$$

Типовая (или электромагнитная) мощность – это мощность, которая передается из одной сети в другую посредством магнитного поля:

$$S_{\text{тип}} = E_{\text{п}} I_{\text{п}} = E_0 I_0, \quad (2.24)$$

где $E_{\text{п}}$, E_0 и $I_{\text{п}}$, I_0 – ЭДС и токи соответственно последовательной и общей обмоток.

Мощность, передаваемая электрическим путем:

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{пр}} - S_{\text{тип}}. \quad (2.25)$$

Коэффициент трансформации автотрансформатора:

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (2.26)$$

Коэффициент экономической эффективности. Расход материалов, габариты и стоимость автотрансформатора определяются в основном типовой мощностью $S_{\text{тип}}$, а его пропускная способность определяется проходной мощностью $S_{\text{пр}}$. Очевидно, чем больше эта разница, тем выгоднее применение автотрансформатора по сравнению с трансформатором таких же массогабаритных параметров. Для численной оценки экономической эффективности вводят соответствующий коэффициент:

$$\beta = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{тип}}}. \quad (2.27)$$

Чем больше этот коэффициент, тем выгоднее установка.

Влияние схем соединения обмоток на экономическую эффективность.

Конструктивно автотрансформатор мало чем отличается от трансформатора, в нем также имеется магнитопровод с обмотками, но если в трансформаторе обмотки не имеют электрической связи между собой и называются «первичная» и «вторичная», то в автотрансформаторе обмотки соединены электрически.

Так как обмотки расположены на общем магнитопроводе, они связаны единым магнитным потоком, поэтому перед подключением их маркируют, т. е. определяют начала и концы. При включении автотрансформатора в сеть в нем создается магнитное поле, и в обмотках индуцируются электродвижущие силы: в последовательной обмотке – $E_{\text{п}}$, в общей – E_0 .

Для однофазного автотрансформатора возможны четыре варианта схем соединения обмоток (рис. 2.14). Покажем, что экономический эффект зависит от вида схемы соединения обмоток автотрансформатора.

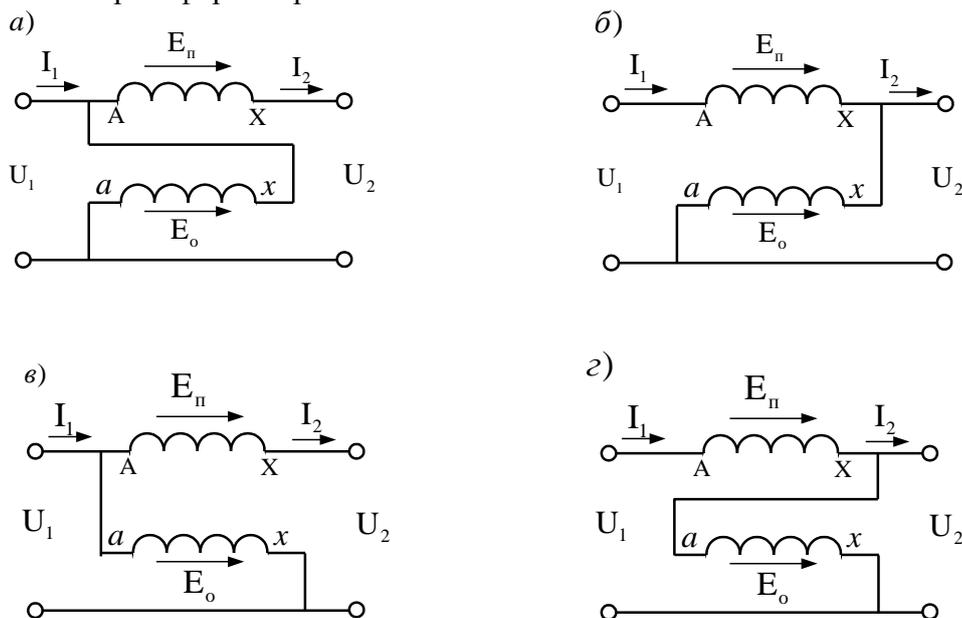


Рис. 2.14. Возможные схемы включения обмоток однофазного автотрансформатора

Для схемы рисунка 2.14 (а), считая, что ЭДС во всех индуктивно связанных обмотках направлены от начала обмотки к ее концу (на рисунках это показано стрелками), и пренебрегая падением напряжения, получим:

$$U_1 = E_0, \quad U_2 = E_0 + E_{\Pi}.$$

Тогда $k_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_0 + E_{\Pi}}{E_0} > 1$, т. е. данная схема автотрансформатора – повышающая. Коэффициент экономической эффективности для этой схемы равен:

$$\beta_1 = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{тип}}} = \frac{U_2 I_2}{E_{\Pi} I_2} = \frac{U_2}{U_2 - U_1} = \frac{U_2 / U_1}{U_2 / U_1 - 1} = \frac{k_{\text{тр}}}{k_{\text{тр}} - 1}.$$

Для схемы рисунка 2.14 (б):

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_0}{E_0 - E_{\Pi}} > 1,$$

т. е. данная схема тоже повышающая, а коэффициент экономической эффективности равен:

$$\beta_2 = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{тип}}} = \frac{U_1 I_1}{E_{\Pi} I_1} = \frac{U_1}{U_2 - U_1} = \frac{U_1 / U_1}{U_2 / U_1 - 1} = \frac{1}{k_{\text{тр}} - 1}.$$

Для схемы рисунка 2.14 (в):

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_0 - E_{\Pi}}{E_0} < 1,$$

т. е. данная схема – понижающая, и коэффициент экономической эффективности равен:

$$\beta_3 = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{тип}}} = \frac{U_2 I_2}{E_{\Pi} I_2} = \frac{U_2 / U_1}{U_2 / U_1 - U_1 / U_1} = \frac{k_{\text{тр}}}{k_{\text{тр}} - 1}.$$

Для схемы рисунка 2.14 (г):

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{E_0}{E_0 + E_{\Pi}} < 1,$$

т. е. данная схема тоже понижающая, и коэффициент экономической эффективности равен:

$$\beta_4 = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{тип}}} = \frac{U_1 I_1}{E_{\Pi} I_1} = \frac{U_1 / U_1}{U_2 / U_1 - U_1 / U_1} = \frac{1}{k_{\text{тр.а}} - 1}.$$

Анализ схем рисунка 2.14 (а, б, в, г) позволяет сделать следующие выводы:

- Схемы (а) и (б) – повышающие, $k_{\text{тр}} > 1$, но вследствие того, что $\beta_1 > \beta_2$, вторая схема экономически менее выгодна и в практике не используется.
- Схемы (в) и (г) – понижающие, $k_{\text{тр}} < 1$, но вследствие того, что $\beta_3 > \beta_4$, четвертая схема в практике тоже не используется.

Другой особенностью автотрансформатора является значительное влияние коэффициента трансформации на его экономическую эффективность. Из таблицы 2.5 видно, что экономическая эффективность автотрансформатора растет с приближением коэффициента трансформации к единице. На практике автотрансформаторы используются при $k_{\text{тр}} \leq 1,5-2,0$.

Зависимость экономической эффективности автотрансформатора от коэффициента трансформации

$k_{тр}$	$\frac{150}{110} = 1,36$	$\frac{500}{330} = 1,51$	$\frac{220}{110} = 2$	$\frac{330}{150} = 2,2$	$\frac{500}{220} = 2,27$	$\frac{330}{110} = 3$
$\beta = \frac{S_{пр}}{S_{тип}}$	3,78	2,78	2	1,83	1,79	1,5

Итак, сравнение трансформатора и автотрансформатора с одинаковыми массогабаритными параметрами дает следующие результаты. Они имеют одинаковые магнитопроводы и обмотки, поэтому их электромагнитная мощность одинакова, но проходная мощность у автотрансформатора больше в β раз. Потери остаются такими же, но их относительное значение в долях проходной мощности уменьшится в β раз, поэтому КПД автотрансформатора выше.

Оценка сопротивления КЗ автотрансформатора. Сопротивление КЗ автотрансформатора, выраженное в Ом, определяется сопротивлением последовательной и общей обмоток, и поэтому при пересоединении обмоток оно не меняется. Однако если сопротивление определять на единицу пропускаемой мощности, т. е. в относительных единицах, то сопротивление КЗ уменьшается в β раз.

При коротком замыкании у зажимов среднего напряжения автотрансформатора общая обмотка оказывается закороченной, а к последовательной обмотке вместо напряжения $U_{ВН} - U_{СН}$ прикладывается напряжение $U_{В}$.

Напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$U_{к.тр} = \frac{Z_{к,тр} I_{В}}{U_{ВН} - U_{СН}},$$

а напряжение короткого замыкания автотрансформатора:

$$U_{к.ат} = \frac{Z_{к,ат} I_{ВН}}{U_{ВН}},$$

следовательно,

$$U_{к.ат} = \frac{U_{к.тр}}{\beta}.$$

В общем случае напряжение КЗ автотрансформатора, также как и трансформатора, находится по следующему выражению:

$$U_{к,ат} = \frac{U_{к}}{U_{2ном}} = \frac{Z_{к,ат} I_{2ном}}{U_{2ном}}.$$

Активное и индуктивное сопротивления автотрансформатора равны:

$$r_{к} = \frac{P_{к} U^2}{S_{ном}^2}; \quad x_{к} = \frac{U_{к} U^2}{S_{ном} 100}.$$

Относительно низкое напряжение КЗ приводит к большим токам КЗ, в результате чего приходится увеличивать сопротивление рассеяния путем уменьшения диаметра стержней и увеличения промежутков между обмотками.

Трехфазный автотрансформатор. В трехфазном автотрансформаторе обмотки обычно соединяются в «звезду» с глухозаземленной нейтралью, и только в редких специальных случаях по схеме «треугольник» (рис. 2.15).

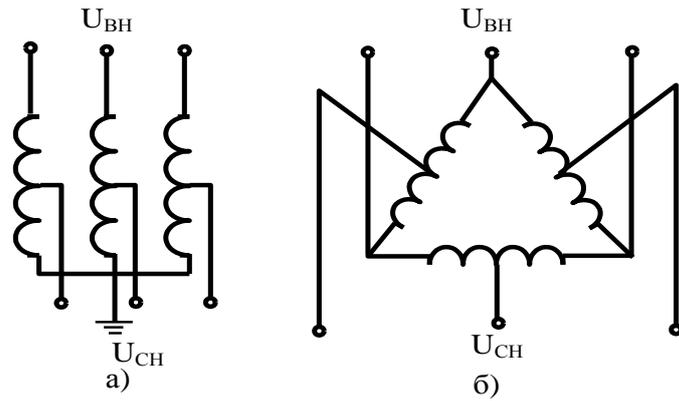


Рис. 2.15. Схемы соединения обмоток трехфазного автотрансформатора в «звезду» (а) и в «треугольник» (б)

На каждом стержне сердечника автотрансформатора размещаются последовательная и общая обмотки одной фазы.

На электростанциях и в электрических сетях энергосистем напряжением 110 кВ и выше нашли широкое применение трехобмоточные автотрансформаторы. Они изготавливаются как на трехфазном магнитопроводе, так и в виде группы из однофазных трехобмоточных автотрансформаторов. В трехобмоточном автотрансформаторе обмотки ВН и СН имеют автотрансформаторную связь и соединяются в «звезду» с заземленной нейтралью, а обмотка НН имеет трансформаторную связь и соединяется в «треугольник» (рис. 2.16 (а)).

Трансформаторная обмотка НН выполняет следующие функции:

- 1) подавление высших гармоник, кратных трем, и электромагнитных эффектов нулевой последовательности;
- 2) использование для подключения блоков синхронных компенсаторов и электрических генераторов.

Мощность этой обмотки обычно выполняют равной $1/3 S_{\text{ном}}$.

На рисунке 2.16 приведены условное обозначение трехобмоточного автотрансформатора и схема соединения обмоток одной фазы.

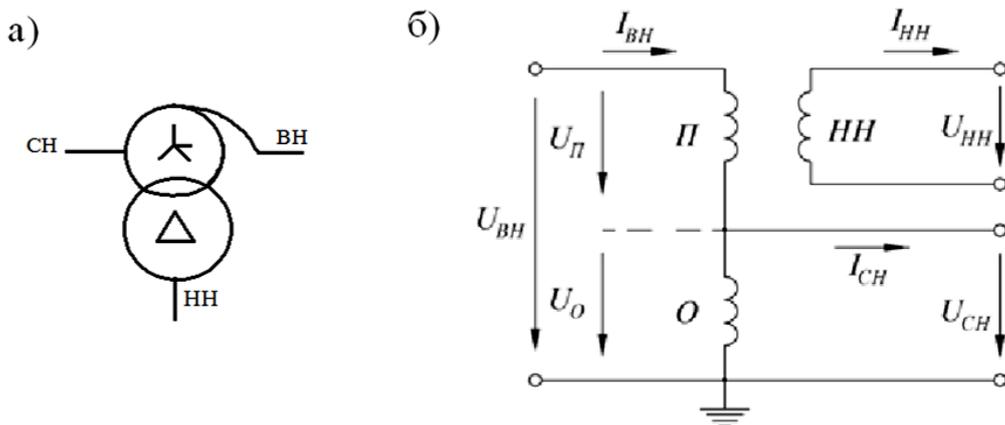


Рис. 2.16. Трехобмоточный автотрансформатор:

- а) условное обозначение;
- б) схема соединения обмоток фазы

Следует отдельно рассмотреть вопрос о заземлении на линиях среднего и высшего напряжения. Дело в том, что нейтраль автотрансформаторных обмоток обязательно глухо заземляется и разземлению не подлежит. Это объясняется тем, что в режиме изолированной нейтрали при замыкании фазы высшего напряжения на землю напряжение на неповрежденных фазах среднего напряжения значительно возрастает.

Действительно, как видно из рисунка 2.17 (а), при замыкании, например, фазы А, на землю напряжение на неповрежденных фазах среднего напряжения возрастает по отношению к земле до значения:

$$U_{CH,неп} = \sqrt{U_{CH}^2 + U_{ВН}^2 - 2U_{ВН}U_{CH}\cos 120^\circ} = \\ = \sqrt{U_{CH}^2/U_{CH}^2 + U_{ВН}^2/U_{CH}^2 + U_{CH}U_{ВН}/U_{CH}^2} = \sqrt{1+k_{тр}^2+k_{тр}} .$$

Например, при $U_{CH} = 110$ кВ – $U_{ВН} = 220$ кВ, соответственно напряжение на неповрежденных фазах среднего напряжения возрастет в $\sqrt{1+4+2} = 2,65$ раз.

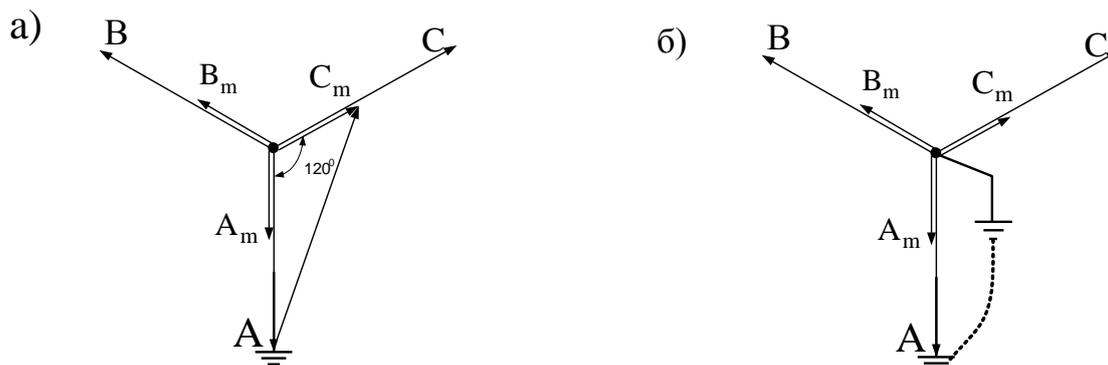


Рис. 2.17. К определению перенапряжений в автотрансформаторе при разземлении нейтрали

Как видно из приведенной оценки, перенапряжение тем больше, чем больше коэффициент трансформации автотрансформатора. Это еще одна из причин ограничения коэффициентов трансформации в автотрансформаторах.

При глухом заземлении нейтрали автотрансформаторных обмоток (рис. 2.17 (б)) замыкание фазы А на землю является коротким замыканием и не влияет на напряжения остальных фаз.

Достоинства и недостатки автотрансформатора.

Достоинства:

- автотрансформатор обеспечивает более дешевую передачу электрических мощностей (экономия составляет 20÷40%);
- потери мощности в автотрансформаторе меньше чем в трансформаторе, а его КПД выше;
- габариты автотрансформатора меньше, что позволяет строить его с большей проходной мощностью и делает возможной транспортировку больших мощностей, чем трансформатора.

Недостатки:

- необходимость глухого заземления нейтрали, что исключает для энергосистемы возможность регулирования токов однофазного КЗ;
- ограниченное значение коэффициента трансформации $k_{тр} \leq 2-3$;
- сложность регулирования напряжения;
- опасность перехода атмосферных перенапряжений с одной обмотки на другую из-за электрической связи обмоток.

ГЛАВА 3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

3.1. Включение трансформатора в сеть

Из практики эксплуатации трансформаторов известно, что при включении трансформатора в сеть часто наблюдается значительный бросок тока, иногда существенно превышающий номинальное значение. И хотя этот бросок тока неопасен для трансформатора (он непродолжительный и не вызывает разрушающих усилий), он может вызвать ложное срабатывание защиты. Разберемся в причинах этого явления.

Рассмотрим процесс включения насыщенного трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой на синусоидальное напряжение сети $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$. Здесь угол ψ определяет значение напряжения в момент включения трансформатора, при $\psi = 0$ напряжение равно нулю, при $\psi = \pi/2$ – максимально.

Переходный процесс при включении трансформатора определяется уравнением баланса напряжений для первичной обмотки:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = i_1 r_1 + \frac{d(L_1 i_1)}{dt}. \quad (3.1)$$

Так как сердечник трансформатора насыщается, индуктивность его обмотки – величина непостоянная: $L_1 = f(i_1)$. Для аналитического решения уравнения (3.1) произведем замену переменной, вместо переменной i_1 введем переменную Φ через известные соотношения: $\Psi_1 = L_1 i_1 = \Phi w_1$. Тогда исходное уравнение примет вид:

$$\frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi) = \frac{r_1}{L_1} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.2)$$

Поскольку в трансформаторах $r_1 \ll L_1$, можно принять $L_1 = \text{const}$, и тогда уравнение (3.2) становится обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка, решение которого хорошо известно, оно состоит из периодической Φ_n и аperiodической Φ_a составляющих:

$$\Phi = \Phi_n + \Phi_a = -\Phi_m \cos(\omega t + \varphi) + \Phi_m \cos(\psi) \cdot e^{-r_1 t / L_1}, \quad (3.3)$$

где $\varphi \cong \pi/2$.

Из этого уравнения следует вывод: наиболее тяжелый случай включения трансформатора в сеть наблюдается тогда, когда напряжение сети проходит через ноль ($\psi = 0$). Причина этого в том, что в трансформаторе возникает максимальный аperiodический поток, а через полпериода после включения он возрастает до величины $\Phi \approx 2\Phi_m$ (рис. 3.1 (а)).

Практически двукратное увеличение магнитного потока приводит к сильному насыщению стали и значительному броску намагничивающего тока, что иллюстрируется на рисунке 3.1 (б). Во многих случаях бросок намагничивающего тока достигает значений 1,5–1,8 номинального тока трансформатора.

Если же трансформатор включается в тот момент, когда напряжение сети проходит через максимум ($\psi = \pi/2$), аperiodический поток не возникает, и включение происходит без броска тока, т. е. без переходного процесса.

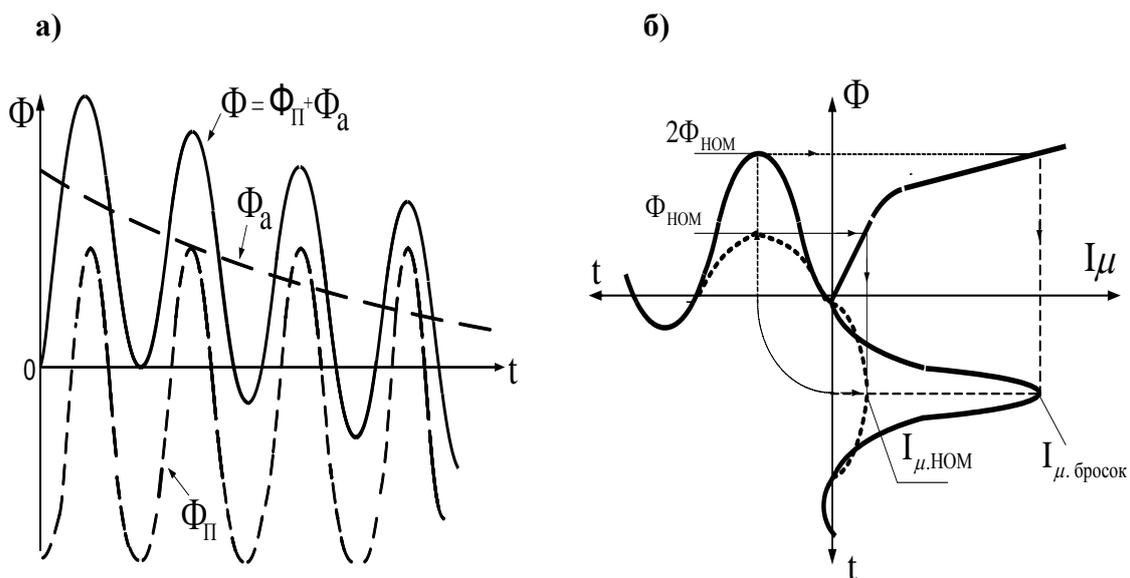


Рис. 3.1. К вопросу о причине броска тока намагничивания при включении трансформатора:

- а) осциллограмма изменения магнитного потока при $\Psi = 0$;
- б) кривая намагничивающего тока при насыщении сердечника

3.2. Параллельная работа трансформаторов

Под параллельной работой трансформаторов понимается работа двух или более трансформаторов при параллельном соединении как первичных, так и вторичных обмоток (рис. 3.2). Параллельная работа трансформаторов дает существенный технический и экономический эффект:

- 1) повышается надежность снабжения потребителей, т. к. выход из строя одного трансформатора не лишает потребителей энергии;
- 2) уменьшается резервная мощность трансформаторов при их параллельном включении;
- 3) в период снижения нагрузок часть трансформаторов может быть отключена, что обеспечивает более экономный режим работы подстанции за счет уменьшения потерь холостого хода;
- 4) упрощается организация ремонтов.

В связи с этим в подавляющем большинстве случаев на подстанциях устанавливают два трансформатора. Кроме того, многие энергосистемы страны содержат кольцевые соединения сетей, связанные через трансформаторные узлы, что фактически тоже является параллельным режимом трансформаторов.

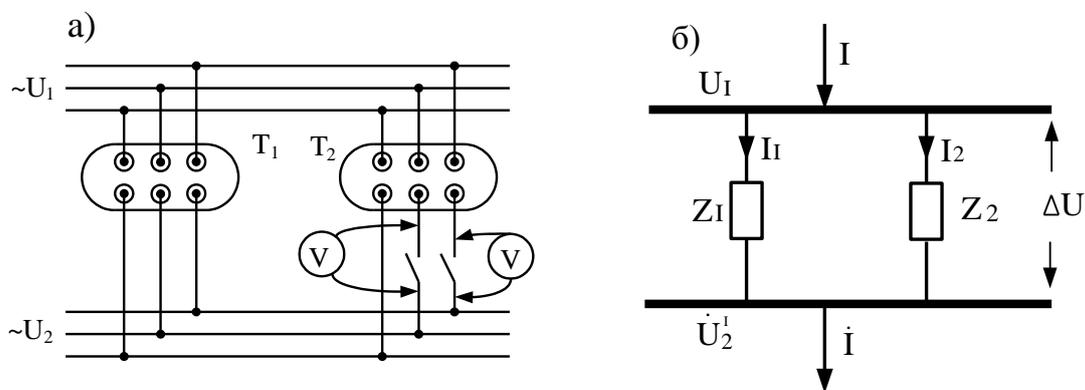


Рис. 3.2. Параллельное включение трехфазных трансформаторов (а), схема замещения (б)

Условия параллельной работы. При параллельном включении трансформаторов необходимо обеспечить следующее:

- 1) уравнивающий ток между трансформаторами должен отсутствовать;
- 2) общая нагрузка должна распределяться между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

Но это может быть выполнено только при соблюдении следующих условий:

1. Должны быть равны первичные и вторичные номинальные напряжения трансформаторов, это сводится к требованию равенства коэффициентов трансформации.
2. Должны быть одинаковыми группы соединения трансформаторов.
3. Должны быть равны напряжения короткого замыкания трансформаторов, а номинальная мощность трансформаторов не должна отличаться более чем в три раза.

3.2.1. Параллельная работа трансформаторов при неравенстве коэффициентов трансформации

На рисунке 3.3 (а) показано включение на параллельную работу двух однофазных трансформаторов. При равенстве коэффициентов трансформации $k_I = k_{II}$ вторичные ЭДС ($E_{2,I}$ и $E_{2,II}$) равны и во вторичных обмотках направлены встречно. Поэтому их сумма равна нулю: $\Delta E = E_{2,I} - E_{2,II} = 0$, и уравнивающий ток будет отсутствовать.

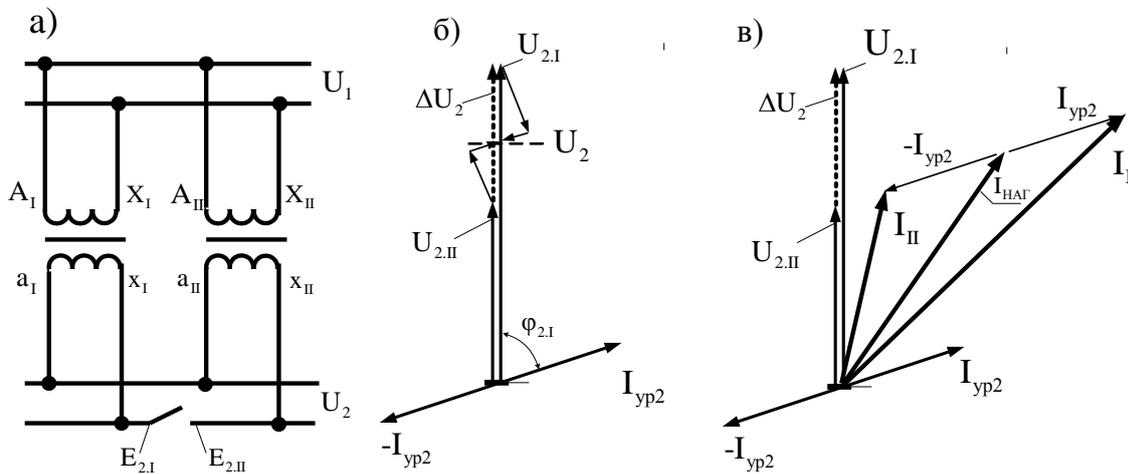


Рис. 3.3. Параллельная работа трансформаторов при неравенстве коэффициентов трансформации:
 а) – схема, б) – векторные диаграммы в режиме ХХ,
 в) – векторные диаграммы в режиме нагрузки

Пусть теперь $k_I > k_{II}$, т. е. $E_{2,I} > E_{2,II}$. В этом случае между обмотками трансформаторов появится разность напряжений:

$$\Delta U = U_{2,I} - U_{2,II},$$

что вызовет во вторичных обмотках уравнивающий ток. Этот ток, циркулируя внутри контура вторичных обмоток, индуктируется в контур первичных обмоток. Во внешнюю сеть этот ток не выходит, и таким образом для уравнивающего тока существует короткозамкнутый контур из двух последовательно соединенных трансформаторов. Величина уравнивающего тока будет ограничена только сопротивлениями этих трансформаторов:

$$\dot{I}_{уп} = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_{к,I} + Z_{к,II}}, \quad (3.4)$$

где $Z_{к,I}$, $Z_{к,II}$ – сопротивления КЗ трансформаторов.

Так как уравнивающий ток протекает только по цепям двух трансформаторов, то он является активно-индуктивным (в основном индуктивным). Иллюстрация физических процессов, связанных с уравнивающим током, дана на векторных диаграммах (рис. 3.3 (б, в)).

Рассмотрим режим ХХ (рис. 3.3 (б)). При $k_I > k_{II}$ и $U_{2,I} > U_{2,II}$ обмотка первого трансформатора является источником уравнивающего тока, и поэтому он отстает от $U_{2,I}$ и вызывает падение напряжения на обмотке первого трансформатора. Напряжение на обмотке первого трансформатора уменьшится до величины U_2 . Обмотка второго трансформатора принимает уравнивающий ток, и за счет этого напряжение на этой обмотке возрастет до величины U_2 . Таким образом, благодаря протеканию по обмоткам уравнивающего тока напряжения обмоток выравниваются.

Рассмотрим режим нагрузки (рис. 3.3 (в)). При нагрузке трансформатора уравнивающий ток в первом трансформаторе складывается с током нагрузки $I_{наг}$, а во втором трансформаторе вычитается из тока нагрузки $I_{наг}$, в результате чего трансформатор с большим вторичным напряжением перегружается, а другой недогружается.

Уравнивающие токи, загружая обмотки трансформаторов, увеличивают потери энергии и снижают суммарную мощность подстанции, поэтому их величина должна быть предельно ограничена. В связи с этим у трансформаторов, включаемых на параллельную работу, коэффициенты трансформации не должны отличаться более чем на $\pm 5\%$.

3.2.2. Работа трансформаторов с разными группами соединения обмоток

Допустим, что параллельно включенные трансформаторы имеют одинаковые первичные и вторичные номинальные напряжения, но разные группы соединения обмоток, например, $Y/Y - 0$ и $Y/Y - 2$. В этом случае вторичные ЭДС соответствующих фаз трансформаторов будут равны по величине, но сдвинуты по фазе на 60° (рис. 3.4). В замкнутом контуре, созданном вторичными обмотками, возникает разность потенциалов, равная:

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}. \quad (3.5)$$

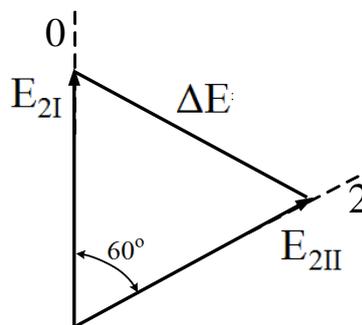


Рис. 3.4. Иллюстрация появления ΔE при параллельной работе трансформаторов с группами $Y/Y - 0$ и $Y/Y - 2$

Под действием ΔE возникает уравнивающий ток:

$$I_{ур} = \frac{\Delta E}{z_{K1} + z_{K2}}. \quad (3.6)$$

Например, для рассмотренных здесь трансформаторов с группами 0 и 2 получаем:

$$\Delta E = 2E_{2,I} \sin 60^\circ = E_{2,I} = U_{2,ном},$$

и уравнивающий ток, равный:

$$I_{ур} = \frac{\Delta E}{2z_k} = \frac{U_{2,ном}}{2z_k} = 0,5I_k,$$

что составляет 50% от установившегося тока короткого замыкания.

Вывод. Параллельная работа трансформаторов с различными группами соединения недопустима.

3.2.3. Работа трансформаторов при неодинаковых напряжениях короткого замыкания

Рассмотрим параллельную работу двух трансформаторов с одинаковыми группами соединений обмоток, с одинаковыми коэффициентами трансформации, но с разными напряжениями КЗ. При указанных условиях уравнивающего тока между трансформаторами не будет, но зато трансформаторы будут неравномерно принимать нагрузку по другой причине. Покажем это.

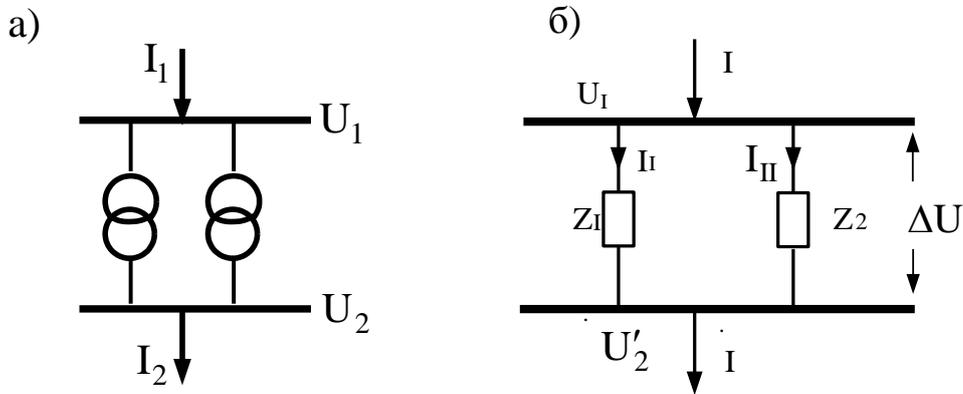


Рис. 3.5. Схема, поясняющая распределение токов между трансформаторами при неодинаковых Z_K

Из рисунка 3.5 видно, что падение напряжения на обоих трансформаторах одинаково:

$$\Delta U = Z_I I_I = Z_{II} I_{II} \quad (3.7)$$

это при $Z_I \neq Z_{II}$ приводит к неравномерному распределению тока нагрузки между трансформаторами:

$$I_I = \frac{\Delta U}{Z_I}; \quad I_{II} = \frac{\Delta U}{Z_{II}} \quad (3.8)$$

Рассмотрим случай $Z_I > Z_{II}$. Из формул (3.8) видно, что трансформатор с меньшим значением сопротивления КЗ принимает больший ток и поэтому будет быстрее перегружаться (рис. 3.6).

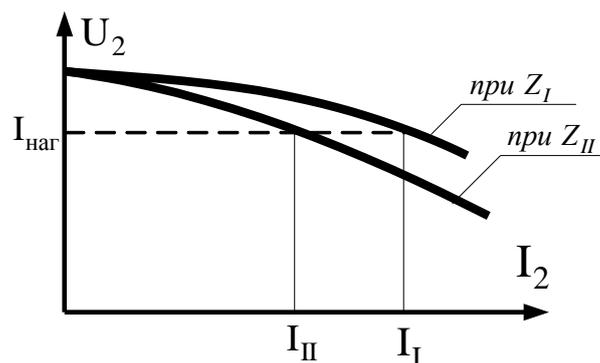


Рис. 3.6. Внешние характеристики трансформаторов с различными сопротивлениями КЗ

Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется по формуле:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{II}}{Z_I} \quad (3.9)$$

$$\Delta U_K = \frac{U_{K1} - U_{K2}}{U_{K, \text{ср}}} \cdot 100 \leq \pm 10\% . \quad (3.10)$$

Из полученного соотношения следует, что мощности параллельно работающих трансформаторов, выраженные в долях их номинальных мощностей, относятся друг к другу как обратные значения номинальных напряжений короткого замыкания. Если $U_{K1} \neq U_{K2}$, то относительная нагрузка будет больше у того трансформатора, у которого U_K меньше.

Допускается различие между напряжениями короткого замыкания трансформаторов, включаемых на параллельную работу, в $\pm 10\%$ от их среднего значения.

При отсутствии уравнивающего тока ток нагрузки распределяется обратно пропорционально сопротивлениям КЗ, и в этом случае можно записать:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} = \frac{Z_{KII} e^{j\varphi_{KII}}}{Z_{KI} e^{j\varphi_{KI}}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} e^{j(\varphi_{KII} - \varphi_{KI})} .$$

Поскольку разность углов ($\varphi_{KII} - \varphi_{KI}$) в обычных случаях (если мощности параллельно работающих трансформаторов не сильно отличаются одна от другой) близка к нулю, то, переходя от отношения комплексов к отношению модулей, имеем:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{KII}}{Z_{KI}} .$$

Если обе части равенства умножить на $\frac{I_{IIH}}{I_{IH}} \frac{U_H}{U_H}$ и левую часть, кроме того, на $\frac{U_H}{U_H}$,

то получим:

$$\frac{S_I}{S_{IH}} : \frac{S_{II}}{S_{IIH}} = \frac{u_{KII}}{u_{KI}} = \frac{1}{u_{KI}} : \frac{1}{u_{KII}} . \quad (3.11)$$

Приведенные выводы могут быть распространены на любое число параллельно работающих трансформаторов. Фактическая нагрузка любого трансформатора, работающего параллельно в группе, определяется по формуле:

$$S_x = \frac{S}{\sum \frac{S_H}{U_{Kx}}} \frac{S_{HX}}{U_{Kx}} , \quad (3.12)$$

где S_x – нагрузка данного трансформатора, кВ·А;

$$S = S_{\text{номI}} + S_{\text{номII}} + S_{\text{номIII}} + \dots ;$$

S_{HX} – номинальная мощность данного трансформатора, кВ·А;

U_K – напряжение короткого замыкания данного трансформатора, %.

При включении на параллельную работу трехобмоточных трансформаторов необходимо соблюдение обозначенных условий для соответствующих пар обмоток обоих трансформаторов и, кроме того, необходимо, чтобы оба трансформатора имели одинаковое расположение вторичных обмоток относительно первичных. При включении двухобмоточного трансформатора на параллельную работу с трехобмоточным должны быть соблюдены те же условия как для двухобмоточного трансформатора, так и для соответствующих двух обмоток трехобмоточного трансформатора, и, кроме того, последний должен иметь двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичных.

Перед первым включением трансформаторов на параллельную работу надо убедиться в том, что на контактах разомкнутого выключателя (рис. 3.3) действуют одинаковые потенциалы, что гарантирует отсутствие уравнивающего тока между трансформаторами. Для этого трансформаторы подключаются с первичной стороны к одной сети, и проверяется совпадение их вторичных напряжений по фазе и амплитуде. Эту операцию называют – фазировкой. Фазировку, как правило, проводят на низком напряжении транс-

форматоров, пользуясь вольтметром, а при высоком напряжении вольтметр включают через трансформаторы напряжения.

При фазировке трехфазных трансформаторов технология проверки зависит еще и от схемы соединения нейтралей.

При фазировке трансформаторов с изолированной нейтралью соединяют перемычкой два одноименных вывода, например, a_1, a_2 (рис. 3.7 (а)), для создания замкнутой электрической цепи, по которой будет проходить ток вольтметра. При фазировке измеряют напряжение между фазами обмоток трансформаторов. Если напряжения между одноименными фазами b_1-b_2 и c_1-c_2 равны нулю, а между разноименными фазами равны линейным напряжениям, то трансформатор можно включать на параллельную работу.

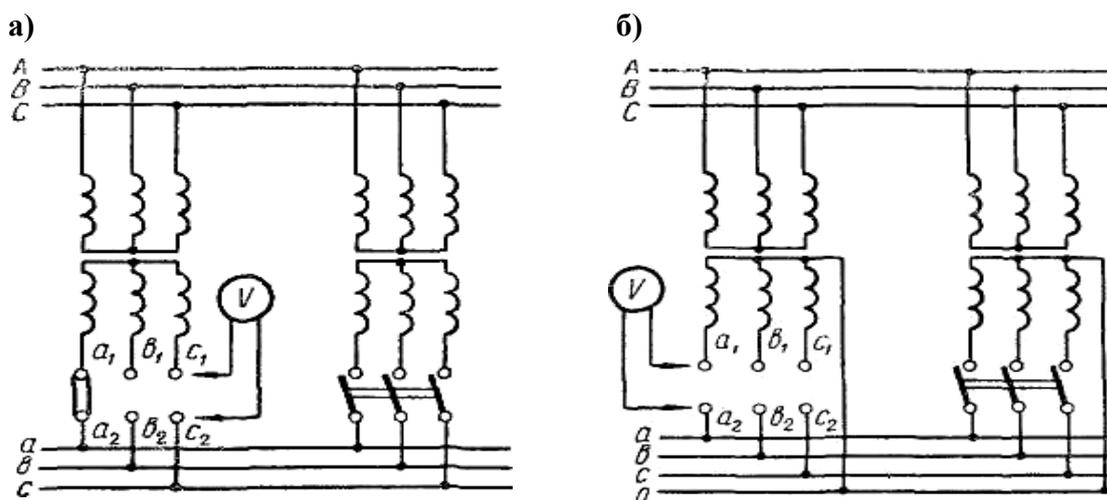


Рис. 3.7. Принцип фазировки трехфазных трансформаторов:

- а) с изолированной нейтралью;
б) с заземленной нейтралью

У трансформаторов с заземленной нейтралью общая потенциальная точка создана нейтралью, поэтому делать перемычку на фазе нельзя (рис. 3.7 (б)). При ошибочном монтаже, например, неправильном чередовании фаз одного из трансформаторов, получится короткозамкнутое соединение двух разноименных фаз с появлением уравнительного тока короткого замыкания.

При фазировке трансформаторов с заземленной нейтралью напряжения между одноименными фазами $a_1-a_2, b_1-b_2, c_1-c_2$ также должны быть равны нулю, а напряжения между разноименными фазами равны линейному напряжению.

Пример.

1. Определить возможность включения на параллельную работу двух трансформаторов со следующими каталожными данными:

$$T1) S_I = 180 \text{ кВ} \cdot \text{А}; U_I = 6300/400 \text{ В}; u_{кI} = 6,0\%; Y/Y_0 - 12;$$

$$T2) S_{II} = 320 \text{ кВ} \cdot \text{А}; U_{II} = 6000/380 \text{ В}; u_{кII} = 6,5\%; Y/Y_0 - 12.$$

2. Определить распределение общей нагрузки 480 кВ·А между трансформаторами.

Решение.

1. Определяем коэффициенты трансформации:

$$k_I = \frac{6300}{400} = 15,75; k_{II} = \frac{6000}{380} = 15,79.$$

2. Определяем среднегеометрическое значение коэффициента:

$$k = \sqrt{k_I k_{II}} = \sqrt{15,75 \cdot 15,79} = 15,77.$$

3. Определяем разницу коэффициентов в %:

$$\Delta k\% = \frac{k_{II} - k_I}{k} 100 = \frac{15,79 - 15,75}{15,77} 100 \approx 0,25\%,$$

т. к. $\Delta k\% < 0,5\%$, то параллельная работа по первому условию допускается.

4. Определяем U_k трансформаторов. Находим среднеарифметическое значение $U_{\text{ср}}$:

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_{kI} + U_{kII}}{2} = \frac{6,0 + 6,5}{2} = 6,25\%.$$

5. Находим ΔU_k %:

$$\Delta U_k \% = \frac{U_{kII} - U_{kI}}{U_{\text{ср}}} = \frac{6,5 - 6}{6,25} 100 = 8\%.$$

Параллельная работа по второму условию допустима, т. к. $\Delta U_k \% = 8\% < 10\%$.

По третьему условию параллельная работа допускается, т. к. группы соединений обмоток одинаковы.

6. Рассчитаем распределение нагрузки $480 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ между трансформаторами:

– Нагрузка первого трансформатора составит:

$$S_{xI} = \frac{S}{\frac{S_{нI} + S_{нII}}{U_{kI}} + \frac{S_{нII}}{U_{kII}}} \frac{S_{нI}}{U_{kI}} = \frac{480}{\frac{180}{6} + \frac{320}{6,5}} \cdot \frac{180}{6} \approx 182 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

– Нагрузка второго трансформатора составит:

$$S_{xII} = \frac{S}{\frac{S_{нI} + S_{нII}}{U_{kI}} + \frac{S_{нII}}{U_{kII}}} \frac{S_{нII}}{U_{kII}} = \frac{480}{\frac{180}{6} + \frac{320}{6,5}} \cdot \frac{320}{6,5} \approx 298 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Вывод: эксплуатация трансформаторов недопустима по причине перегрузки первого трансформатора.

3.3. Регулирование напряжения

3.3.1. Способы регулирования напряжения

Проблемы регулирования напряжения в энергосистемах решаются несколькими техническими средствами и методами, но наиболее эффективно – с помощью силовых трансформаторов. Используют два способа регулирования напряжения трансформаторами:

- изменением коэффициента трансформации;
- включением трансформатора последовательно в линию регулируемого напряжения.

Для изменения коэффициента трансформации на одной из обмоток предусматривают кроме основного вывода дополнительные ответвления и соответствующие переключающие устройства. Существует два вида переключающих устройств:

1. Устройства для переключения числа витков при отключенном трансформаторе, т. е. без возбуждения, – ПБВ. Этими устройствами снабжают большинство трансформаторов, они позволяют изменять коэффициент трансформации в пределах $\pm 5\%$.

2. Устройства для переключения числа витков под нагрузкой – РПН. Эти устройства рассчитаны на изменение коэффициента трансформации в более широких пределах – до 16% .

Ответвления для устройств ПБВ предусмотрены посередине обмотки, вывод – на конце. Ответвления для устройств РПН расположены на $\frac{1}{4}$ и $\frac{3}{4}$ высоты обмотки.

3.3.2. Регулирование напряжения устройствами РПН

Переключающее устройство РПН с реактором.

Устройства РПН обеспечивают переключение с одного ответвления обмотки на другое без разрыва цепи рабочего тока трансформатора. Данные переключающие устройства бывают двух типов: на реакторах и на активных сопротивлениях.

Схема переключающего устройства РПН с реактором приведена на рисунке 3.8 (а). Элементами переключающего устройства являются:

- 1) избиратель ответвлений, его контакты замыкают и размыкают ветви цепи без тока;
- 2) контакторы, размыкающие и замыкающие ветви цепи с рабочим током;
- 3) токоограничивающий реактор;
- 4) приводной механизм.

В исходном положении контакты избирателя I_1 и I_2 присоединены к одному ответвлению обмотки, а контакторы K_1 и K_2 замкнуты. Рабочий ток делится поровну между ветвями сдвоенного реактора. Так как токи в реакторе направлены встречно, его сопротивление мало, и падение напряжения в нем невелико.

Процесс переключения с одной ступени на другую протекает в следующей последовательности. Контакт K_2 размыкает рабочий ток, при этом весь ток проходит через контакты избирателя I_1 , контактор K_1 и ветвь реактора. Контакт избирателя I_2 переходит на второе ответвление, замыкается контактор K_2 . Рабочий ток делится между ветвями реактора. Появляется циркулирующий ток, вызванный напряжением между соседними ответвлениями. Этот ток ограничивается значительным сопротивлением реактора.

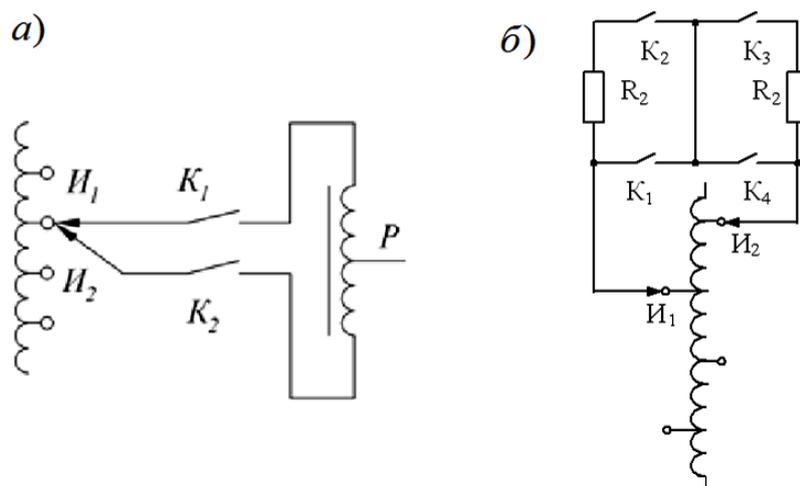


Рис. 3.8. Схемы переключающих устройств:

- а) – РПН с реактором;
- б) – РПН с резисторами

Затем размыкается контактор K_1 , контакт избирателя I_1 переходит на соседнее ответвление, и снова замыкается контактор K_1 . Процесс переключения закончен. Переключение на следующее ответвление происходит в той же последовательности. Рассмотренный процесс переключения происходит относительно медленно, все элементы РПН рассчитаны на длительное прохождение тока. Избиратель и реактор размещены в баке трансформатора, контакторы размещены в особом отсеке, чтобы обеспечить доступ к контактной системе, требующей ухода. Реактор имеет заземленный стальной сердечник, а изоляция обмотки реактора соответствует рабочему напряжению. Чем выше напряжение, тем больше размеры реактора. Это ограничивает область применения рассматриваемой схемы. Она может быть использована, если регулируемая часть обмотки находится со стороны нейтрали.

Переключающие устройства РПН с резисторами. РПН с резисторами более совершенны, они относятся к быстродействующим устройствам (рис. 3.8 (б)). Резисторы рассчитаны на кратковременный ток и относительно невелики, а все устройство весьма компактно. Применяют контакторы в масле, а также с вакуумными камерами, обладающими значительными преимуществами. Механизм переключающего устройства снабжен мощными пружинами и обеспечивает большую скорость переключения.

Принцип действия устройства РПН следующий. Работа РПН делится на две фазы:

1. Выбор желаемого ответвления регулировочной обмотки.
2. Переключение под нагрузкой на выбранное ответвление.

Бестоковый выбор ответвления осуществляется избирателем. На каждую фазу он имеет по два ряда неподвижных контактов. К одному ряду присоединяются нечетные ответвления регулировочной обмотки, а к другому четные. С каждым рядом неподвижных контактов работает один подвижный контакт, совершающий круговое движение. Когда ток протекает через четные контакты, нечетные находятся в обесточенном состоянии и могут выбрать нечетное ответвление. Если токоведущими являются нечетные контакты, бестоковый выбор соседнего ответвления осуществляется четными контактами. После окончания избирателем процесса выбора ответвления контактор в течение долей секунд перебрасывает нагрузку на выбранную ступень без разрыва цепи питания потребителя. Контакты каждой фазы контактора разделены на два плеча: четное, связанное электрически с подвижным контактом четной группы избирателя, и нечетное, связанное с нечетной группой контактов избирателя. Каждое плечо контактора состоит из подвижных и неподвижных контактов.

Регулирование напряжения на всем диапазоне устройством РПН, имеющем избиратель без предизбирателя, будет выполнено после включения избирателем всех ступеней в работу от 1 до n-го ответвления. Увеличение диапазона регулирования достигается при помощи предизбирателя, который выполняется как реверсор. При этом регулирование напряжения на всем диапазоне достигается двукратным поочередным включением всех ступеней в работу от 1 до n-го ответвления. При первом обходе витки регулировочной обмотки включены согласно с витками основной обмотки. При втором обходе – встречно. Определенная последовательность переключения контактов избирателя и контактора обеспечивается кинематической схемой устройства РПН.

Диапазон и число ступеней регулирования РПН трансформаторов и автотрансформаторов приведены в таблице 3.1 согласно ГОСТ 11920-85 [8], 12965-85 [9] и 17544-85.

Таблица 3.1

Диапазон и число ступеней регулирования РПН трансформаторов

Класс напряжения, кВ	Мощность, МВ·А	Диапазон и число ступеней регулирования	Обмотка с ответвлениями
Двухобмоточные трансформаторы			
35 110	1–6,3 2,5	$\pm 4 \times 2,5\% \dots \pm 6 \times 1,5\%$ +15%; +10 ступеней –12%; –8 ступеней	ВН НН
110 220	6,3–125 32–200	$\pm 16\%$; ± 9 ступеней $\pm 12\%$; ± 12 ступеней	ВН (в нейтрали) ВН (в нейтрали)
Трехобмоточные трансформаторы			
110 220	6,3–80 25–63	$\pm 16\%$; ± 9 ступеней $\pm 12\%$; ± 12 ступеней	ВН (в нейтрали) ВН (в нейтрали)

3.3.3. Последовательные регулировочные трансформаторы

Данные устройства предназначены для регулирования напряжения при отсутствии устройства РПН у главных трансформаторов (автотрансформаторов).

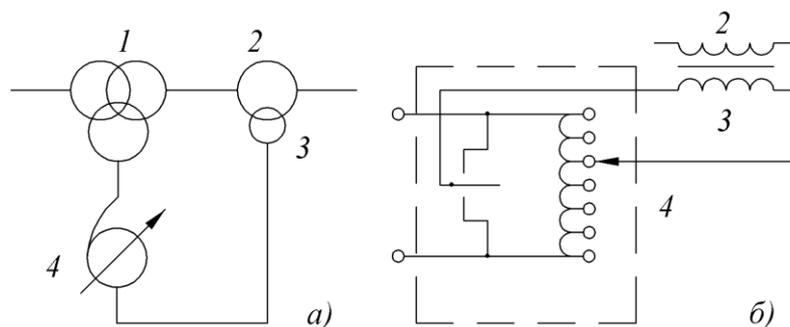


Рис. 3.9. Схемы регулирования с помощью последовательного трансформатора:

- а) схема включения последовательного трансформатора;
- б) схема устройства последовательного трансформатора

Последовательный трансформатор подключается к главному трансформатору (автотрансформатору) со стороны линейных выводов высшего или среднего напряжения или со стороны нейтрали. Последовательный регулировочный трансформатор имеет две обмотки: последовательную – 2, включаемую последовательно с соответствующей обмоткой главного трансформатора (автотрансформатора) – 1, и обмотку возбуждения – 3, получающую питание от обмотки высшего напряжения главного трансформатора через регулируемый автотрансформатор – 4. Изоляция переключающего устройства регулируемого автотрансформатора может быть значительно ниже изоляции соответствующего устройства, встроенного в главный трансформатор. Напряжение последовательной обмотки может быть изменено в пределах от нуля до полного (определяемого требуемым диапазоном регулирования) с изменением знака после перехода через ноль, т. е. оно может прибавляться к напряжению обмотки главного трансформатора или вычитаться из него. Изоляция вторичной обмотки последовательного трансформатора должна быть изолирована на полное напряжение линии. Достоинство данного способа регулирования в том, что процесс регулирования напряжения производится в сети низкого напряжения, что позволяет снизить стоимость аппаратуры.

ГЛАВА. 4. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА

4.1. Общие сведения

Конструктивное исполнение трансформатора зависит от его назначения и области применения. Однако почти все трансформаторы имеют одни и те же главные конструктивные элементы. В состав силового трансформатора входят: магнитопровод, обмотки, остов, отвод и вводы, РПН или ПБВ, бак трансформатора, расширитель, система охлаждения, контрольно-измерительная и защитная аппаратуры, фильтры термосифонные (абсорбционные). Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляют активную часть трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют неактивными (вспомогательными) частями.

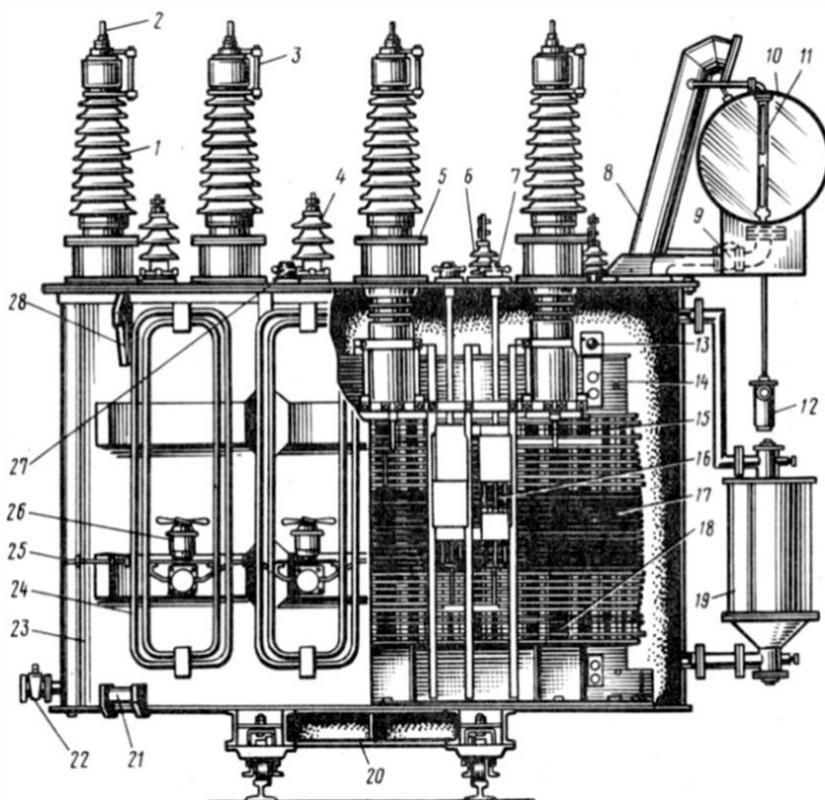


Рис. 4.1. Силовой трехфазный трехобмоточный трансформатор ТДТГ – 16000/110:

- 1 – маслонаполненный ввод ВН (110 кВ); 2 – токопроводящий стержень (шпилька);
- 3 – указатель уровня масла ввода ВН; 4, 6 – вводы СН (35 кВ) и НН (10 кВ);
- 5 – бумажно-бакелитовый цилиндр ввода ВН;
- 7 – привод переключающего устройства обмотки ВН;
- 8 – предохранительная труба; 9 – газовое реле; 10 – расширитель (консерватор);
- 11 – указатель уровня масла в расширителе; 12 – воздухоосушитель;
- 13 – проушина для подъема активной части трансформатора;
- 14 – ярмовая балка; 15 – линейный отвод ВН;
- 16 – переключающее устройство обмотки ВН;
- 17 – обмотка ВН; 18 – экранирующие (емкостные) витки обмотки ВН;
- 19 – термосифонный фильтр; 20 – тележка с катками;
- 21 – площадка для установки домкрата; 22 – маслоспускной кран;
- 23 – бак; 24 – радиатор (трубчатый охладитель);
- 25 – электропроводка питания электродвигателей дутья;
- 26 – электродвигатель с крыльчаткой (дутьевой вентилятор);
- 27 – привод переключающего устройства обмотки СН;
- 28 – крюк для подъема трансформатора

Трансформаторы, у которых активная часть погружена в бак с трансформаторным маслом, называют *маслонаполненными* или *масляными*. Трансформаторное масло, омывая обмотки и магнитопровод, улучшает электрическую изоляцию токоведущих частей и обеспечивает лучшие условия охлаждения трансформатора.

Трансформаторы, активная часть которых не погружена в масло, называют *сухими*. Сухие трансформаторы предназначены для установки в закрытых помещениях с относительной влажностью не выше 80%.

4.2. Конструктивные элементы активной части трансформатора

Обмотки трансформатора состоят из медных или алюминиевых проводников и изоляционных деталей. Конструкция обмоток должна обеспечивать динамическую стойкость при механических воздействиях в процессе изготовления и эксплуатации, а также хороший отвод тепла, чтобы температура обмоток не превышала значения, установленного для данного класса изоляции.

Электрическая прочность изоляции обмоток должна обеспечивать надежную работу трансформатора как при номинальных условиях, так и при перенапряжениях или кратковременных повышениях напряжения, возникающих в энергосистемах при коммутации и грозовых явлениях.

Конструкция обмоток включает: изоляционные детали, образующие главную и продольную изоляции, выводные концы, регулировочные ответвления, емкостные кольца и экраны, а также приспособления для осевой стяжки обмоток.

Плотность тока в обмотках выбирают по условиям нагрева в пределах $1 \div 2,5$ А/мм² – в сухих и $2 \div 4,5$ А/мм² – в масляных трансформаторах в зависимости от мощности и конструктивного исполнения трансформатора. По условиям технологии максимальное сечение круглого проводника выбирается примерно до 20 мм², а прямоугольного – до 80 мм², соответственно, предельный ток одного проводника – 45 и 360 А.

Основным элементом обмотки является виток, который выполняется одним проводом или группой параллельных проводов. Ряд витков на цилиндрической поверхности называют слоем. Витки могут группироваться в катушки. По направлению намотки обмотки делятся на правые и левые подобно резьбе винта. Большинство обмоток трансформаторов выполняются с левой намоткой для удобства изготовления.

По способу размещения обмоток на стержне (рис. 4.2) их разделяют на концентрические и дисковые (или чередующиеся).

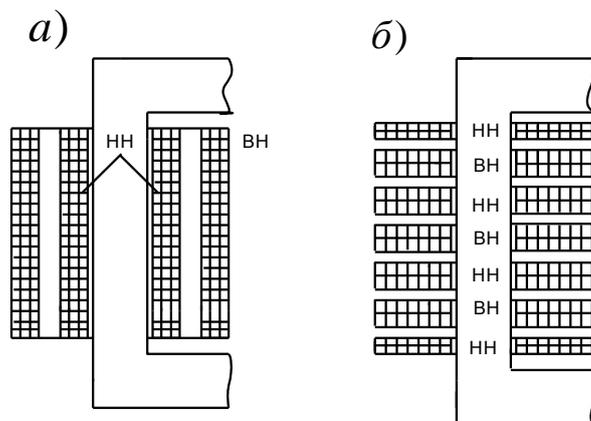


Рис. 4.2. Расположение обмоток на стержне: а) концентрическое; б) чередующее

По конструктивно-технологическим признакам обмотки делятся на *цилиндрические*, *винтовые* и *непрерывные*. Обмотки каждого из этих типов могут подразделяться на *одно-*

или многослойные цилиндрические, одно- или многоходовые винтовые, дисковые, переплетенные. В мощных трансформаторах, предназначенных для питания электропечей, обмотки выполняются из листовой меди или алюминия.

Цилиндрические слоевые обмотки выполняются из проводов прямоугольного или круглого сечения. Слои обмотки составляют витки, наматываемые по винтовой линии. При намотке каждый виток слоя укладывают вплотную к предыдущему витку в направлении высоты обмотки. Переход из слоя в слой осуществляется в процессе намотки без пайки. Витки состоят из одного или нескольких параллельных проводов, располагаемых обычно рядом в осевом направлении.

Однослойные и двухслойные обмотки – это обычно обмотки низшего напряжения на напряжение до 690 В в трансформаторах мощностью до 630 кВ·А. Также в трансформаторах мощностью 25–630 кВ·А применяются многослойные цилиндрические обмотки из круглого медного или алюминиевого провода в качестве обмоток ВН при напряжениях от 3 до 35 кВ и обмоток НН при напряжениях от 3 до 10 кВ.

Широкое применение получили многослойные цилиндрические обмотки из прямоугольного провода. Многослойная цилиндрическая обмотка из прямоугольного провода применяется в качестве обмотки ВН в трансформаторах мощностью от 630 до 40 000–80 000 кВ·А классов напряжения 10 и 35 кВ. Применение этих обмоток при использовании специальных экранов позволяет обеспечить равномерное распределение электрического поля в трансформаторе при перенапряжениях.

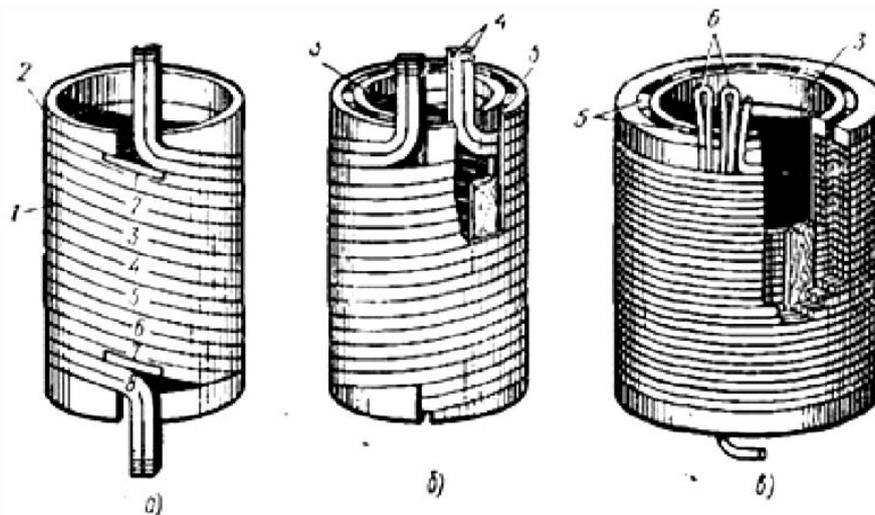


Рис. 4.3. Цилиндрические обмотки:

- а) – однослойная; б) – двухслойная; в) – многослойная из круглого провода;
- 1 – витки из прямоугольного провода; 2 – разрезные выравнивающие кольца;
- 3 – бумажно-бакелитовый цилиндр; 4 – выводной конец первого слоя обмотки;
- 5 – вертикальные рейки; 6 – внутренние ответвления обмотки

Катушечная многослойная цилиндрическая обмотка состоит из ряда последовательно соединенных многослойных катушек. Такое разделение необходимо для уменьшения напряжения между слоями. Обычно катушечные обмотки выполняют в виде последовательно соединенных парных катушек.

Дисковые катушечные обмотки состоят из ряда одинарных или двойных катушек. Витки катушки намотаны один на другой по спирали в радиальном направлении. Намотанные катушки собирают на шаблоне и соединяют пайкой. Осевые и радиальные каналы образуются П-образными замковыми прокладками. Такие обмотки широко применяются в высоковольтных трансформаторах в качестве входных катушек.

Непрерывная катушечная обмотка состоит из ряда катушек, расположенных в осевом направлении и соединенных между собой последовательно без пайки. Число катушек

в обмотке – от 30 до 150. Витки в катушке наматываются плашмя по спирали в радиальном направлении. Катушки наматываются на рейках, образующих вертикальные каналы. На рейки надеваются прокладки, создающие радиальные каналы между катушками. Каждый виток обмотки может состоять из одного или нескольких параллельных проводов. Путем перестановки (транспозиции) параллельных проводов на переходах из катушки в катушку обеспечивается выравнивание их активного и индуктивного сопротивлений. Непрерывность намотки достигается перекладыванием витков в катушках. Переходы осуществляются на уровне крайнего внутреннего или наружного витка изгибом провода на ребро.

В механическом отношении непрерывная катушечная обмотка является одной из самых прочных обмоток, применяемых в трансформаторах. С увеличением мощности трансформатора и ростом осевой составляющей механических сил при коротком замыкании растут также радиальный размер катушек обмотки и ее механическая устойчивость. Таким образом, условия механической прочности не ставят практически никаких пределов применению обмотки этого типа, и она может применяться на очень большом диапазоне мощностей трансформаторов, от 160 до 63 000 кВ·А и выше. Обмотка этого типа с успехом применяется также и в широком диапазоне напряжений, от 2–3 до 110, 220 кВ.

Винтовая обмотка состоит из ряда витков, наматываемых по винтовой линии. В трансформаторах большой мощности число параллельных проводников может достигать многих десятков. Винтовые обмотки бывают одно-, двух- и многоходовыми. Двухходовые и многоходовые обмотки состоят из двух или более отдельных винтовых обмоток, вмотанных одна в другую. Каналы для охлаждения образуются так же, как и в непрерывной обмотке.

Если витки, соединенные параллельно, находятся на различных расстояниях от стержня, то они будут сцеплены с различными потоками рассеяния, и в них наводятся разные ЭДС. Параллельные проводники будут иметь различные индуктивные сопротивления, и токи будут распределяться неравномерно. Чтобы обеспечить равномерное распределение токов в параллельных ветвях обмотки, необходимо сделать одинаковыми или близкими друг другу сопротивления параллельных ветвей обмотки. Для этого выполняется транспозиция параллельных проводников, образующих виток обмотки. При полной транспозиции каждый проводник занимает поочередно все положения, возможные в пределах одного витка. При частичной транспозиции перекладка осуществляется в нескольких местах.

В трансформаторах и автотрансформаторах большой мощности широко применяются *транспонированные провода*, которые снижают трудоемкость обмоточных работ. Транспонированные провода состоят из параллельных транспонированных проводников, изолированных один от другого эмалевой пленкой и к тому же имеющих общую изоляцию из кабельной бумаги.

В качестве проводникового материала для обмоток применяется также алюминиевая фольга (лента). Применение алюминиевой фольги позволяет уменьшить габариты обмоток за счет улучшения их охлаждения, что достигается равномерным распределением температуры по сечению катушки. При этом еще обеспечивается возможность механизации процесса намотки обмоток.

Магнитопроводы трансформаторов делятся на стержневые и броневого. У однофазного броневого трансформатора имеются один стержень и два ярма, закрывающие (бронирующие) обмотки (рис. 4.4 (б)). Трехфазный броневого трансформатор получается из трех однофазных, если их поставить друг на друга (рис. 4.5). При такой конструкции потоки в ярмах равны половине потока в стержнях.

Стержневую и броневого конструкции трансформаторов можно применять в самом широком диапазоне мощностей и напряжений. В России и в большинстве европейских стран предпочтение отдается стержневой конструкции из-за более легких условий монтажа и ремонта.

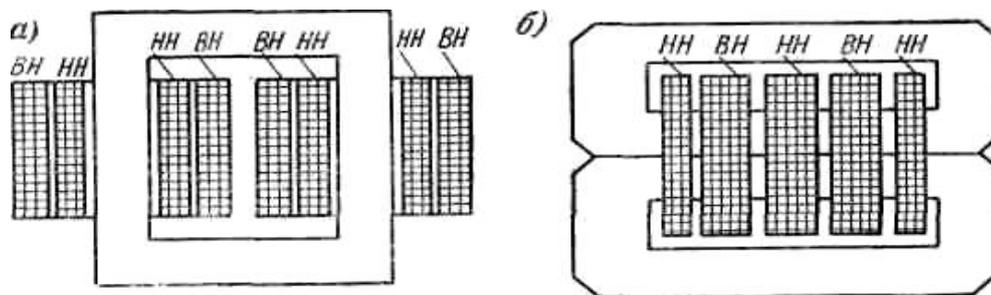


Рис. 4.4. Схема однофазного трансформатора: а) стержневого; б) броневое

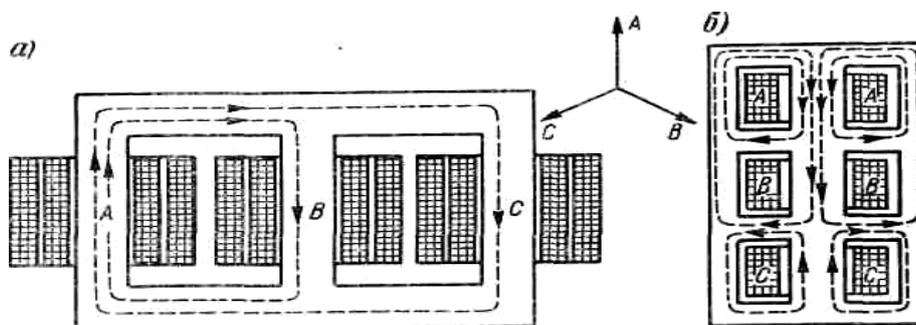


Рис. 4.5. Схема трехфазного трансформатора: а) стержневого; б) броневое

При броневой конструкции может быть достигнута большая компактность трансформатора за счет применения бака, прилегающего к сердечнику. Вертикально расположенные обмотки трансформатора броневое типа обеспечивают весьма эффективное охлаждение трансформатора, особенно если применить принудительную направленную циркуляцию масла.

Однофазные стержневые трансформаторы имеют два стержня, несущие обмотки, а трехфазные – три стержня. Стержни соединяются верхним и нижним ярами.

В трехстержневом трансформаторе обмотки всех фаз имеют одинаковое направление намотки. При этом по яру проходит поток, равный потоку стержня. Так как размеры сечения яра не связаны с размерами обмоток, то их легко можно сделать, и действительно, иногда их делают, несколько большими, чем размеры сечения стержня, с целью уменьшить потери в стали. Трехстержневая конструкция магнитопровода является магнитосвязанной: поток каждой фазы всегда замыкается через стержни других фаз. Эта система несимметрична, т. к. длины магнитных путей фаз неодинаковы. Из-за этого намагничивающий ток средней фазы имеет меньшую величину, чем ток крайних фаз. Однако у больших стержневых трансформаторов разница между величиной токов возбуждения фаз невелика, т. к. стержни обычно имеют большую длину, чем яра, а следовательно, и большее магнитное сопротивление.

Магнитные бронестержневые системы трансформатора по сравнению со стержневыми имеют меньшую высоту магнитопроводов, что очень важно при транспортировке, т. к. это позволяет им лучше вписаться в железнодорожные габариты. Поэтому в трансформаторах больших мощностей, обычно начиная со 100 МВ·А, из-за трудностей транспортировки применяют бронестержневой сердечник, схематически показанный на рисунке 4.6. Сердечник состоит из трех стержней, на которых размещены обмотки трех фаз, и двух ярм, имеющих горизонтальные и вертикальные части.

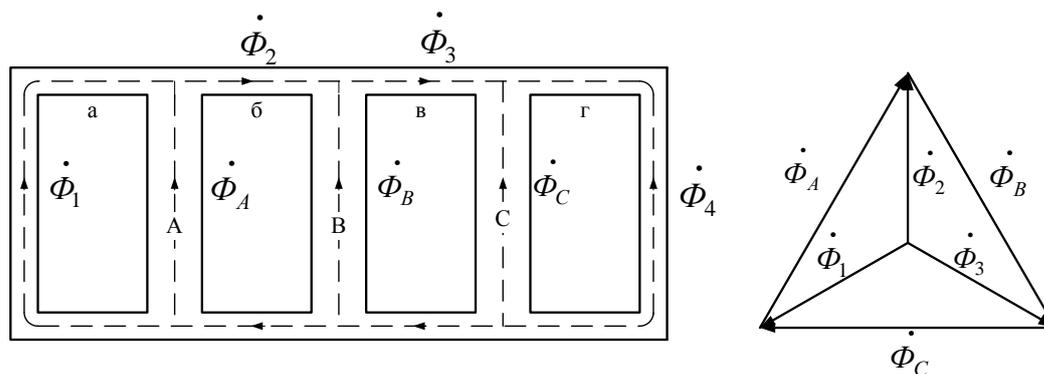


Рис. 4.6. Схема бронестержневого трансформатора

На рисунке пунктиром показаны пути магнитного потока, а стрелами – выбранные положительные направления. Так как поток не выходит из сердечника, то $\Phi_1 + \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C + \Phi_4 = 0$. Считая потоки трех фаз синусоидальными и симметричными, имеем $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$, т.е. между потоками Φ_A, Φ_B, Φ_C и Φ_1, Φ_2, Φ_3 существуют такие же соотношения, как между линейными и фазными величинами. Соответственно, из рисунка 4.6 следует:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Phi}_A &= \dot{\Phi}_2 - \dot{\Phi}_1 \\ \dot{\Phi}_B &= \dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_2 \\ \dot{\Phi}_C &= -\dot{\Phi}_3 - \dot{\Phi}_4 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

При симметричных и синусоидальных потоках стержней Φ_A, Φ_B и Φ_C потоки в ярах Φ_1, Φ_2 и Φ_3 кроме основных могут содержать и третьи гармоники, т. к. это не противоречит уравнениям (4.1), отсюда $\Phi_1 + \Phi_4 = 0$, т. е. потоки в боковых ярах в любой момент времени равны и противоположны по фазе. Несмотря на то, что потоки яра содержат третьи гармоники, для практических расчетов этим можно пренебречь и считать, что потоки яра синусоидальны и равны:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_{ст} / \sqrt{3}, \quad (4.2)$$

где $\Phi_{ст}$ – поток в стержне, Вб. Благодаря этому высота яра может быть уменьшена, а высота сердечника при этом уменьшится почти на высоту яра по сравнению с обычным трехстержневым трансформатором.

Нужно отметить, что вес стали и потери в бронестержневом сердечнике получаются большими, чем в трехстержневом трансформаторе, примерно на величину веса стали в боковых ярах и величину потерь в них.



Рис. 4.7. Беспилевая конструкция трехстержневого сердечника для трансформатора мощностью 125 МВ·А

В современных трансформаторах прессовка стержней производится при помощи бандажей из немагнитной стали или стекловолокна. Такая конструкция требует применения рулонной стали.

Остов – конструктивная основа активной части трансформатора. Он состоит из вертикальных стержней, перекрытых сверху и снизу ярмами, в результате чего образуется замкнутая магнитная система (магнитопровод).

Магнитопровод шихтуется (набирается) из листов холоднокатаной рулонной электротехнической стали с изоляционным покрытием. Прессовка стержней осуществляется бандажками из стеклоленты, прессовка ярм – ярмовыми балками, стянутыми стальными полубандажками. Магнитная система заземляется через ярмовые балки на бак трансформатора. Шихтованные конструкции при сборке трудоемки, т. к. сначала собирается магнитопровод, затем расшихтовывается одно ярмо, надеваются на стержни обмотки, и снова зашихтовывается ярмо. Стыковые конструкции проще при сборке, но ток холостого хода у трансформаторов с такими магнитопроводами больше, чем у бесстыковых конструкций.

Конструкции магнитных систем трансформаторов малой мощности выполняются так, чтобы обеспечить наиболее экономичный и простой способ их изготовления. Одним из распространенных способов изготовления магнитных систем таких трансформаторов является способ машинной навивки из ленточной электротехнической стали или стали специальных сплавов.

Витые сердечники позволяют автоматизировать изготовление трансформаторов, использовать преимущества холоднокатаных сталей. В витом сердечнике нет стыковых соединений, магнитный поток переходит из одного слоя в другой, и магнитное сопротивление сердечника определяется натягом ленты при намотке.

Для точной установки активной части в баке нижние опорные подкладки остова имеют отверстия под шипы, приваренные ко дну бака. На верхних ярмовых балках имеются крюки или скобы для стропления при подъеме активной части и остова, а также резьбовые втулки для винтов осевой прессовки обмоток.

4.3. Конструктивные элементы вспомогательной части трансформатора

Отводы, вводы – промежуточные токоведущие элементы. Соединение концов обмоток между собой и с вводами, подключение регулировочных ответвлений к переключателям и другие соединения внутри трансформатора осуществляются с помощью проводников, называемых *отводами*, которые выполняются в виде шин, прутков или гибкого кабеля. Для вывода концов обмоток с целью подключения к электрической сети служат *вводы* – фарфоровые проходные изоляторы, через внутреннюю полость которых проходит токоведущий стержень. Внешняя конфигурация и размеры вводов зависят от класса напряжения, рода установки и тока. Съёмные вводы позволяют заменять изоляторы, не снимая крышки.

При токе до 630 А токоведущие стержни вводов выполнены в виде стержня с резьбой на концах.

При токе 1 000 А и выше нижняя часть стержня имеет отверстия, позволяющие обеспечить надежность разъемного контакта. Ввод должен обеспечить надежную изоляцию токоведущего стержня от заземленных элементов.

Устройство ввода на напряжение 6–10 кВ и ток 3 000 А показано на рисунке 4.8. Медный стержень 14 проходит через отверстие фарфорового изолятора 13. Верхний конец стержня уплотнен резиновым кольцом 6, втулкой 5 и гайкой 4. Стержень бортиком 12 опирается через электрокартонную шайбу 11 на уступ изолятора 13, а двумя выступами 10 входит в вертикальные пазы изолятора, что не позволяет ему проворачиваться при завинчивании гаек. Резиновая прокладка 9 уплотняет разъем между колпаком 7 и верхним торцом изолятора, а прокладка 19 уплотняет стык между крышкой и изолятором подтягиванием гаек 16 на шпильках 15, приваренных к крышке 20.

Для присоединения к электросети на стержень в верхней его части навинчивается контактный наконечник 1 с болтами 2 (с гайками и шайбами), который закрепляют болтами 3 (резьбовая часть наконечника разрезана). При токах менее 800 А для подсоединения ввода к внешней электросети стержень снабжен вместо наконечника гайками и шайбами. Гетинаксовая втулка 21 служит для центровки стержня по оси, шайбы 22 и гайки 23 – для подсоединения демпферов внутри бака, винт 5, ввинченный в латунный колпак 7, – для спуска воздуха из ввода при заполнении его маслом. Ввод крепят к крышке 20 прижимными кулачками 18. Фланец 17 служит для того, чтобы кулачки не смещались с борта изолятора.

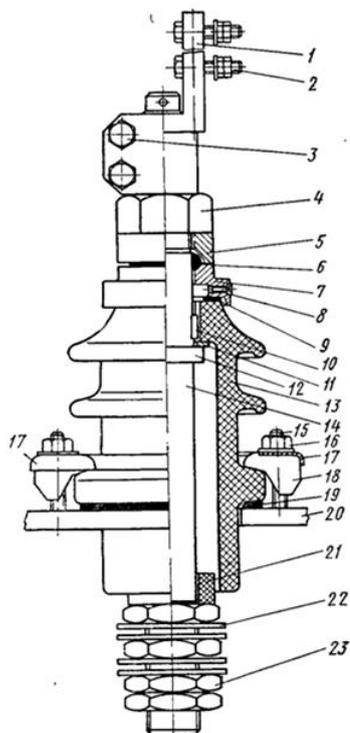


Рис. 4.8. Съёмный ввод на ток 3 000 А и напряжение 6–10 кВ

Устройства регулирования напряжения обеспечивают изменение числа витков обмотки ВН, изменяя тем самым напряжение на обмотке НН. Эти устройства бывают двух типов: РПН (регулирование под нагрузкой) – обеспечивает регулирование напряжения под нагрузкой трансформатора и переключатели ПБВ (переключение без возбуждения) – предназначены для изменения числа витков обмотки ВН при отключенном от сети трансформаторе.

РПН состоит из следующих основных сборочных единиц: механизма переключения, в состав которого входят контактор и избиратель, привода, углового редуктора, соединительных валов. В комплекте с устройством РПН поставляются также автоматический регулятор напряжения трансформатора, защитное реле и датчик-реле температуры.

Нужные технические характеристики (номинальный ток, номинальное напряжение, напряжение ступени, число ступеней регулирования и т.д.) для конкретного устройства РПН обеспечиваются применением различных типоразмеров контактора и избирателя. Типоразмеры контактора отличаются между собой величиной сопротивления токоограничивающего резистора. Типоразмеры избирателя отличаются между собой величиной номинального тока.

Устройство РПН по своей конструкции является погружным. Это означает, что механизм переключения встраивается в бак трансформатора, вне бака находятся только корпус с несущим фланцем, привод и элементы передачи.

ПБВ также располагается внутри бака трансформатора. Коммутатор изготавливается из бакелизированной бумажной трубы, внутри которой установлены ножевые контакты. Ножи замыкаются губковыми контактами, которые смонтированы на бакелитовом валу. Вал механически сопряжен с кривошипным приводом, который установлен с наружной

стороны бака трансформатора. Для переключения напряжения на одну ступень необходимо произвести рукояткой привода полный один оборот.

Бак трансформатора с масляным охлаждением (традиционной компоновки) представляет собой резервуар с маслом, в котором находится активная часть трансформатора.

Нагретое при работе трансформатора масло охлаждается через стенки бака и охлаждающие устройства. Форма баков чаще всего овальная – тогда она приближается к форме активной части трансформатора и является наиболее простой и механически прочной. Крепление активной части в баке трансформатора в продольном и поперечном направлениях осуществляется посредством распорных винтов.

С изменением электрической нагрузки и температуры окружающего воздуха температура масла в трансформаторе изменяется. Колебания температуры вызывают изменение объема масла в баке. Чтобы бак трансформатора всегда был заполнен маслом, на трансформаторах класса 6 кВ и выше мощностью 25 кВ·А и более устанавливают расширитель. Баки трансформаторов 150 кВ рассчитаны на вакуум с остаточным давлением не более 5 кПа и избыточным давлением 50 кПа. Баки трансформаторов 110 кВ рассчитаны на вакуум с остаточным давлением 50 кПа и избыточным давлением 50 кПа.

На баке крепятся коробка зажимов для присоединения цепей контрольно-измерительной и защитной аппаратур и другие комплектующие узлы и детали.

На баке имеются приспособления для стропления при подъеме собранного трансформатора и перекачки его на собственных каретках в пределах подстанции, а также опорные площадки для подъема трансформатора домкратами.

Расширитель (рис. 4.9) представляет собой металлический сосуд (обычно цилиндрической формы) и имеет две емкости.

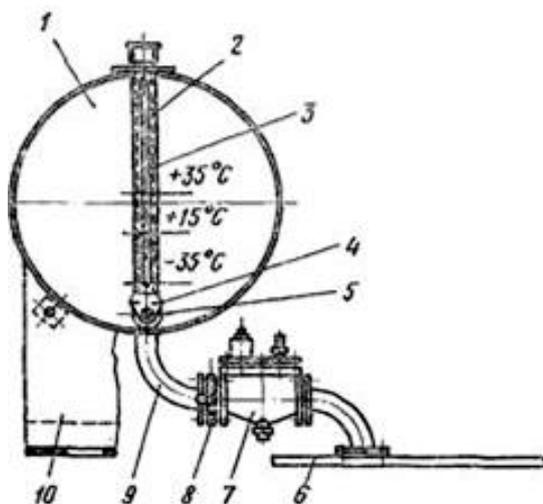


Рис. 4.9. Расширитель:

- 1 – бак расширителя; 2 – маслоуказатель; 3 – маслоуказательное стекло;
- 4 – угольник; 5 – запирающий болт; 6 – крышка трансформатора; 7 – газовое реле;
- 8 – плоский кран; 9 – трубопровод; 10 – опорная пластина

Одна основная емкость предназначена для компенсации температурных колебаний объема масла в баке, другая – относительно меньшего объема – для компенсации колебания объема масла в контакторе переключающего устройства (РПН). Емкость расширителя должна обеспечивать постоянное наличие в нем масла при всех режимах работы трансформатора. Расширитель предохраняет масло трансформатора от непосредственного соприкосновения с воздухом, что защищает масло от преждевременного окисления.

Существуют герметизированные трансформаторы с азотной защитой масла, у которых пространство между зеркалом масла и верхней стенкой расширителя заполнено азотом. В этих трансформаторах заливка маслом производится под вакуумом.

4.4. Системы охлаждения трансформатора

Потери мощности в трансформаторе пропорциональны его мощности в степени $3/4$, а поверхность охлаждения пропорциональна его мощности в степени $1/2$, т. е. с увеличением мощности трансформатора его потери растут быстрее, чем поверхность охлаждения. Поэтому с увеличением мощности трансформаторов приходится применять более интенсивные системы охлаждения.

Конструктивное выполнение трансформатора во многом определяется способом его охлаждения, который зависит от величины номинальной мощности. В силовых трансформаторах для отвода тепла от обмоток и магнитопровода применяют следующие способы охлаждения: воздушное, масляное и посредством негорючего жидкого диэлектрика. Каждому виду охлаждения присвоено соответствующее условное обозначение.

Трансформаторы с воздушным охлаждением (естественным или с дутьем) называются сухими. Различают сухие трансформаторы с воздушно-барьерной изоляцией обмоток и с обмотками (или одной обмоткой ВН), залитыми эпоксидным компаундом (литая изоляция). Сухие трансформаторы с воздушно-барьерной изоляцией обмоток общего назначения изготавливаются мощностью до 2 500 кВ·А включительно и предназначены для установки в сухих, закрытых помещениях (относительная влажность воздуха до 80%). Их достоинства – пожаробезопасность, простота конструкции, отсутствие жидкого диэлектрика. Трансформаторы с литой изоляцией общего назначения выпускаются также мощностью до 2 500 кВ·А, но их дополнительными достоинствами, по сравнению с трансформатором с воздушно-барьерной изоляцией, являются: большой диапазон изменения температуры окружающего воздуха (от -45 до $+40$ °С), относительная влажность воздуха до 98% при температуре 25 °С, уменьшенный уровень шума.

В эксплуатации сухие трансформаторы удобнее масляных, т. к. исключают необходимость периодической очистки и смены масла. Следует, однако, отметить, что воздух обладает меньшей электрической прочностью, чем трансформаторное масло, поэтому в сухих трансформаторах все изоляционные промежутки и вентиляционные каналы делают большими, чем в масляных. Из-за меньшей теплопроводности воздуха по сравнению с маслом электромагнитные нагрузки активных материалов в сухих трансформаторах также приходится брать меньшими, чем в масляных, что приводит к увеличению сечения проводов обмоток и магнитопровода. Как следствие этого, масса активных частей (обмоток и магнитопровода) сухих трансформаторов больше, чем масляных. Сухие трансформаторы изготавливают на напряжения обмотки ВН до 20 кВ включительно.

Сухие трансформаторы с естественным воздушным охлаждением могут иметь открытое (С), защищенное (СЗ) или герметизированное (СГ) исполнение. Трансформаторы типа СЗ закрывают защитным кожухом с отверстиями, а типа СГ – герметическим кожухом. Для повышения интенсивности охлаждения применяют обдув обмоток и магнитопровода потоком воздуха от вентилятора. Сухие трансформаторы с воздушным дутьем имеют условное обозначение СД.

Трансформаторы с масляным охлаждением (масляные – М). При мощности трансформатора более 2 500 кВ·А воздушного охлаждения уже недостаточно, и для повышения интенсивности охлаждения используют трансформаторное масло. В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками погружают в бак, наполненный тщательно очищенным минеральным (трансформаторным) маслом. Трансформаторное масло обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух, и хорошо отводит тепло от обмоток и сердечника трансформатора к стенкам бака, имеющего большую площадь охлаждения, чем у самого трансформатора. Погружение магнитопровода в бак со специальным маслом обеспечивает также повышение электрической прочности изоляции

его обмоток, предотвращает увлажнение изоляции и потерю ее изоляционных свойств под влиянием атмосферных воздействий.

Естественное масляное охлаждение применяется, как правило, для трансформаторов мощностью до 6 300 кВ·А включительно. В трансформаторах мощностью до 20–32 кВ·А выделяется сравнительно небольшое количество тепла, поэтому баки имеют гладкие стенки; в более мощных трансформаторах (40÷1 800 кВ·А) поверхность охлаждения бака искусственно увеличивают применением ребристых или волнистых стенок либо окружают бак системой труб, в которых масло циркулирует за счет естественной конвекции.

При мощности трансформаторов 10 000 кВ·А и более применяется масляное охлаждение с воздушным дутьем. Обдувание поверхности радиаторов позволяет увеличить теплоотдачу на 50% и более. Трансформаторы снабжаются системой дутьевого охлаждения при помощи вентиляторов с электродвигателями.

При мощности более 100 000 кВ·А естественного масляного охлаждения уже недостаточно, поэтому используют масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла, что значительно увеличивает отвод тепла от наиболее нагретых точек трансформатора.

У самых мощных трансформаторов поверхности бака недостаточно для размещения необходимого числа радиаторов, поэтому переходят к принудительной циркуляции масла и воды (Ц) или к принудительной циркуляции масла и воздуха (ДЦ). К баку трансформатора подключают центробежный насос, который прогоняет горячее масло через воздушный или водяной охладитель. Охлаждение водой более эффективно, чем воздухом, при этом стоимость системы охлаждения ниже и расход энергии меньше.

В масляных трансформаторах масло во время работы нагревается и расширяется. При уменьшении нагрузки оно, охлаждаясь, возвращается к первоначальному объему. Поэтому масляные трансформаторы мощностью 25 кВ·А и выше снабжают небольшим дополнительным баком-расширителем, соединенным с внутренней полостью основного бака. При нагревании трансформатора изменяется и объем масла, находящегося в расширителе. Его объем составляет около 10% от объема масла, находящегося в основном баке. Применение расширителя позволяет значительно сократить поверхность соприкосновения масла с воздухом, что уменьшает его загрязнение и увлажнение. Для более надежного предохранения масла от окисления трансформаторы большой мощности выполняют герметизированными, с полной изоляцией масла, находящегося в расширителе, от атмосферного воздуха. Это осуществляется с помощью подушки, образующейся из инертного газа (например, азота – азотная защита), расположенной между поверхностью масла и гибкой растягивающейся мембраной. Трансформаторы с азотной защитой можно выполнять и без расширителя.

Трансформаторы требуют проведения профилактических испытаний трансформаторного масла в процессе хранения, ввода в эксплуатацию, эксплуатации, проведения текущих и капитальных ремонтов. Кроме того, трансформаторы ТМ (с естественным масляным охлаждением) дополнительно требуют проведения систематических осмотров для определения степени увлажнения сорбента воздухоосушителя. При насыщении сорбента влагой требуется его замена на новый (на приобретение которого потребуется расход средств) или на регенерированный (на его регенерацию потребуется расход тепловой энергии).

Трансформаторы с жидким негорючим диэлектриком. Эти трансформаторы имеют герметизированный бак, заполненный негорючим жидким диэлектриком (синтетические материалы – совтол и др.), и могут быть выполнены с естественным охлаждением (Н) или с воздушным дутьем (НД). Они пожаробезопасны и могут устанавливаться в закрытых помещениях. Их выпускают мощностью 160÷2 500 кВ·А при напряжении 6 и 10 кВ. Однако применяемая в таких трансформаторах жидкость (совтол) экологически небезопасна, поэтому в настоящее время эти трансформаторы находят ограниченное применение.

При маркировке трансформаторов используются следующие условные обозначения систем охлаждения согласно ГОСТ Р 52719 (см.: табл. 4.1).

Обозначения систем охлаждения³

Вид системы охлаждения трансформаторов	Условное обозначение вида системы охлаждения, принятое в:	
	Российской Федерации	зарубежных странах (МЭК)
Сухие трансформаторы:		
Естественное, воздушное, при открытом исполнении	С	AN
Естественное, воздушное, при защищенном исполнении	СЗ	ANAN
Естественное, воздушное, при герметичном исполнении	СГ	ANAN
Воздушное, с принудительной циркуляцией воздуха	СД	ANAF
Масляные трансформаторы:		
Естественная циркуляция воздуха и масла	М	ONAN
Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д	ONAF
Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла	МЦ	OFAN
Естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла	НМЦ	ODAN
Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	ДЦ	OFAF
Принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла	НДЦ	ODAF
Принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла	Ц	OFWF
Принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла	НЦ	ODWF

4.5. Контрольно-измерительная и защитная аппаратура

Современный силовой трансформатор снабжен рядом вспомогательных устройств, обеспечивающих его нормальную эксплуатацию и предупреждающих аварии.

Газовое реле трансформатора (рис. 4.10) и **защитное реле РПН** устанавливаются в маслопроводах, соединяющих бак трансформатора и контактор переключающего устройства с соответствующими отсеками расширителя. Они предназначены для отключения трансформатора при внутренних повреждениях в нем или в контакторе переключающего устройства. Газовое реле также сигнализирует о накоплении газа или воздуха в корпусе реле и о снижении уровня масла в трансформаторе.

При серьезной аварии в случае, когда отключение трансформатора почему-либо запоздало, в баке может развиваться значительное давление, способное разорвать его. Для предотвращения такой возможности на крышке трансформатора устанавливается выхлопная труба, через которую выбрасываются избыточные массы газов и масла. Отверстие выхлопной трубы закрыто стеклянным диском – мембраной, которая лопается при резком повышении давления.

³ *Примечание.* Обозначения систем охлаждения масляных трансформаторов, залитых синтетическим маслом, включая жидкий негорючий диэлектрик (например, LNAF и LFAF), указывают в НД на данные трансформаторы.

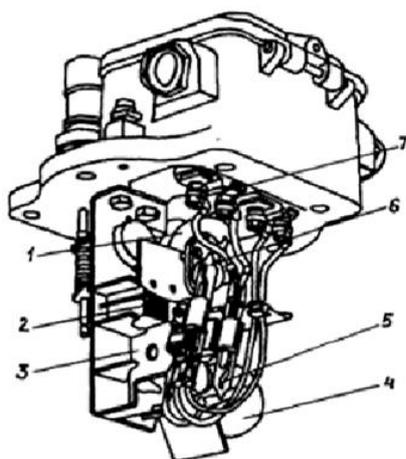


Рис. 4.10. Общий вид газового реле:

1 – верхний поплавок; 2 – постоянный магнит; 3 – клапан;
4 – нижний поплавок; 5, 6 – переключающие лампы; 7 – зажимы подключения

Маслоуказатели устанавливают для контроля за уровнем масла в емкостях расширителя. Трансформатор снабжают двумя маслоуказателями, которые выполняют одновременно функции реле минимального и максимального уровней масла. Контакты маслоуказателя основной емкости расширителя и меньшего объема (для РПН), срабатывающие при минимальном уровне масла, задействованы на отключение, а срабатывающие при максимальном уровне масла, – на сигнал. На правую шкалу циферблата нанесены метки, обозначенные числами в градусах Цельсия. Каждая из них означает уровень масла в расширителе при соответствующей средней температуре масла в трансформаторе.

Встроенные трансформаторы тока предназначены для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам и устройствам защиты и управления. Трансформаторы тока используются в составе силовых трансформаторов или автотрансформаторов в качестве комплектующих изделий.

Встроенные трансформаторы тока по назначению делятся на трансформаторы тока для измерений и трансформаторы тока для защиты. Один и тот же трансформатор тока может использоваться как для измерений, так и для защиты с соответствующим классом точности. По типу исполнения различают следующие трансформаторы тока: встроенные, с одной вторичной обмоткой для измерения или защиты, с одним или несколькими коэффициентами. Трансформатор тока состоит из неразрезного ленточного кольцевого магнитопровода, выполненного из электротехнической стали, с намотанной на него вторичной обмоткой. Первичной обмоткой служит ввод силового трансформатора.

Термометр – это датчик-реле температуры, который предназначен для автоматического управления холодильными и нагревательными установками путем замыкания или размыкания электрической цепи управления при изменении температуры контролируемой среды.

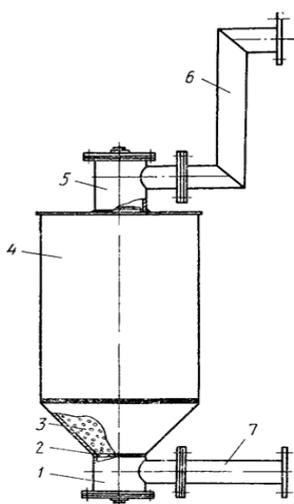
Воздухоосушители предназначены для очистки от влаги и промышленных загрязнений воздуха, поступающего в расширитель трансформатора при температурных колебаниях уровня масла. Воздухоосушитель представляет собой наполненный силикагелем цилиндр емкостью 2,5 и 5 кг. В нижнюю часть воздухоосушителя помещен масляный затвор, работающий по принципу сообщающихся сосудов. Затвор предотвращает свободный доступ воздуха в воздухоосушитель и очищает засасываемый воздух от посторонних примесей. Воздухоосушитель имеет указатель уровня масла в масляном затворе. В верхней части цилиндра установлен патрон, наполненный силикагель-индикатором. Патрон снабжен смотровым отверстием, закрытым стеклянным диском. По мере увлажнения силикагель-индикатор в патроне меняет свою окраску с голубой на розовую.

Затворы предназначены для установки на силовых масляных трансформаторах в качестве запорных устройств в местах прохода масла. Затворы предназначены только для

полного открытия или полного перекрытия масляных трубопроводов. Промежуточное положение диска не допускается.

Предохранительный клапан предохраняет бак от разрушения при внезапном повышении давления (газовом толчке), которое возникает вследствие интенсивного разложения масла во время повреждений внутри трансформатора. Клапан срабатывает при избыточном давлении внутри бака свыше 50 кПа.

Термометры манометрические конденсационные показывающие сигнализирующие (в дальнейшем термометры) предназначены для измерения теплотехнических параметров и управления внешними электрическими цепями от сигнализирующих устройств приборов. В зависимости от способа соединения термобаллона с корпусом термометры подразделяются на местные (с жесткой связью) и дистанционные. Соединение термобаллона с корпусом для местных термометров осуществляется по двум исполнениям: с радиальным расположением термобаллона и с осевым расположением термобаллона. Рабочее положение корпуса для дистанционных термометров – вертикальное, для местных – вертикальное и горизонтальное. Термометры не предназначены для эксплуатации во взрывопожароопасных помещениях.



Термосифонный фильтр (рис. 4.11) служит для непрерывной регенерации масла в процессе работы трансформатора и представляет собой металлический сосуд 4, заполненный силикагелем 3 и присоединенный трубами 6 и 7 к верхнему и нижнему патрубкам бака. Силикагель загружают в термосифонный фильтр через бункер 5, а отработанный высыпают через бункер 1. В бункерах установлены металлические решетки с сетками 2, которые предотвращают попадание силикагеля в бак трансформатора. Циркуляция масла через фильтр основана на конвекции за счет разности температур верхнего и нижнего слоев масла.

Рис. 4.11. Термосифонный фильтр

Термосифонные фильтры применяют в трансформаторах мощностью 160 кВ·А и более.

4.6. Электротехнические стали

Электротехническая сталь – это тонколистовая сталь, используемая при изготовлении шихтованных магнитопроводов электротехнического оборудования.

Свойства. В зависимости от требуемых свойств электротехническая сталь содержит различное количество кремния. В зависимости от технологии производства электротехнические стали разделяют на холоднокатаную (изотропную или анизотропную, количество кремния до 3,3%) и горячекатаную (изотропную, количество кремния до 4,5%). Нередко в качестве легирующей добавки в электротехнической стали содержится алюминий (до 0,5%). Иногда электротехнические стали условно разделяют на динамную (0,8–2,5% кремния) и трансформаторную (3–4,5% кремния).

Качество электротехнической стали характеризуется: электромагнитными свойствами (удельными потерями, коэрцитивной силой и индукцией), анизотропностью свойств (разницей в значениях свойств металла вдоль и поперек направления прокатки), геометрическими размерами и качеством листов и полос, механическими свойствами, а также параметрами электроизоляционного покрытия. Снижение удельных потерь в стали обеспечивает уменьшение потерь энергии, а повышение максимальной индукции стали позволяет уменьшить габариты, снижение анизотропии свойств стали улучшает характеристики устройств.

Одним из основных материалов магнитопровода трансформатора является тонколистовая электротехническая сталь. В течение многих лет для магнитных систем трансформаторов применялась листовая сталь горячей прокатки с толщиной листов 0,5 или 0,35 мм. Качество этой стали постепенно улучшалось, однако удельные потери в ней были высоки.

Появление в конце 40-х гг. XX в. холоднокатаной текстурованной стали, т.е. стали с определенной ориентировкой зерен (кристаллов), имеющей значительно меньшие удельные потери и более высокую магнитную проницаемость, позволило увеличить индукцию в магнитной системе и существенно уменьшить массу материалов при одновременном уменьшении потерь энергии в трансформаторе. Вместе с этим было получено и уменьшение расхода остальных материалов – изоляционных, конструкционных, масла и т.д. Применение холоднокатаной стали позволило также уменьшить габариты и увеличить мощность трансформатора в одной единице, что особенно важно для трансформаторов большой мощности, размеры которых ограничиваются условиями перевозки по железным дорогам.

Одной из кардинальных особенностей холоднокатаной стали является анизотропия ее магнитных свойств, т.е. различие этих свойств в различных направлениях внутри листа или пластины стали. Наилучшие магнитные свойства (наименьшие удельные потери, в 1,5–2 раза ниже, чем у горячекатаной, и наибольшую магнитную проницаемость – на 25–30% выше) эта сталь имеет в направлении прокатки.

Конструкция магнитной системы трансформатора с учетом анизотропии магнитных свойств холоднокатаной стали должна быть выполнена так, чтобы в целых ее частях – стержнях и ярмах – вектор индукции магнитного поля имел направление, совпадающее с направлением прокатки стали.

Система обозначений стали в РФ. Обозначение марок стали состоит из 4-х цифр:

➤ *первая цифра* – структурное состояние и вид прокатки: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой;

➤ *вторая цифра* – содержание кремния: 0 – отсутствие кремния; 1 – от 0,4 до 0,8% кремния; 2 – от 0,8 до 1,8%; 3 – от 1,8 до 2,8%; 4 – от 2,8 до 3,8%; 5 – от 3,8 до 4,8%;

➤ *третья цифра* – группа по основной нормируемой характеристике: 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц; 1 – удельные потери при 1,5 Тл и 50 Гц; 2 – удельные потери при 1,0 Тл и 400 Гц; 6 – магнитная индукция при напряженности поля 0,4 А/м; 7 – магнитная индукция при 10 А/м; 8 – коэрцитивная сила.

Если три первые цифры в обозначении марки стали указывают тип стали, то *четвертая цифра* – порядковый номер типа стали.

Таблица 4.2

Область использования сталей

Марка стали	Назначение
1211, 1212, 1213, 2110	Для якорей и полюсов электрических машин постоянного тока, для роторов и статоров асинхронных двигателей промышленной частоты мощностью до 100 кВт, для магнитопроводов приборов
1311, 1312	Для роторов и статоров асинхронных двигателей мощностью от 100 до 400 кВт. Пластичность хорошая
1411, 1412, 2411	Для роторов и статоров асинхронных двигателей мощностью 400–1 000 кВт, маломощных силовых трансформаторов, для двигателей повышенной частоты. Пластичность удовлетворительная

4.7. Основные параметры трансформатора

Согласно ГОСТ Р 52719 к основным параметрам трансформатора относятся:

– номинальная мощность трансформатора (при этом указывают также мощности основных обмоток трехобмоточных трансформаторов и мощность обмотки НН трехобмоточных автотрансформаторов);

- номинальные напряжения основных обмоток на всех ответвлениях;
- условное обозначение схемы и группы соединений обмоток;
- вид переключения ответвлений (РПН, ПБВ), диапазон и число ступеней регулирования напряжения;
- наибольший допустимый ток в общей обмотке автотрансформатора;
- потери холостого хода и короткого замыкания на основном ответвлении;
- напряжение короткого замыкания, приведенное к номинальной мощности (для трансформаторов с РПН указывают нормированные значения на основном и крайних ответвлениях, для остальных трансформаторов – на основном ответвлении);
- ток холостого хода на основном ответвлении;
- установленная мощность двигателей системы охлаждения;
- полная масса (или транспортная масса);
- удельная масса;
- масса масла;
- габаритные размеры.

Примечания.

1. Если потребителем выдвигаются дополнительные (специальные) требования по перегрузкам и, исходя из них, изготавливается трансформатор, то в перечень основных параметров включают параметры, характеризующие нагрузочную способность.
2. Номинальные мощности трансформаторов определены ГОСТ 9680, номинальные напряжения – ГОСТ 721 и ГОСТ 21128.
3. Номинальная частота питающей сети должна быть 50 Гц по ГОСТ 13109.
4. Расчетную температуру, к которой следует приводить потери и напряжение короткого замыкания, принимают равной:
 - 115 °С – для трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости F, H, С по ГОСТ 8865;
 - 80 °С – для трансформаторов с системой охлаждения НЦ, НДЦ;
 - 75 °С – для остальных трансформаторов.

4.8. Классификация силовых трансформаторов

Силовые трансформаторы классифицируют по следующим категориям согласно ГОСТ 11677:

1. По условиям работы – на трансформаторы, предназначенные для работы в нормальных и специальных условиях.
2. По виду изолирующей и охлаждающей среды – на масляные и сухие трансформаторы, трансформаторы, заполненные негорючим жидким диэлектриком, трансформаторы с литой изоляцией.
3. По типам, характеризующим назначение и основное конструктивное исполнение, – однофазные или трехфазные, с РПН или ПБВ и т.д.

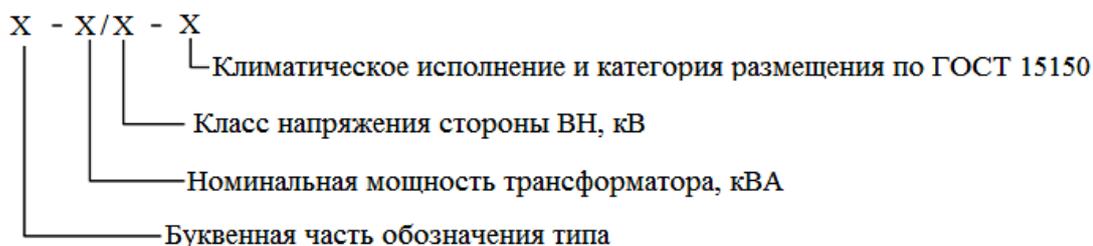
Нормальные условия работы характеризуются такими данными, как:

- высота установки над уровнем моря – не более 1 000 м, кроме трансформаторов класса напряжения 750–1 150 кВ, для которых высота установки над уровнем моря не должна превышать 500 м;
- климатическое исполнение – У по ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1. При этом среднесуточная температура воздуха должна быть не более 30 °С и среднегодовая температура воздуха не более 20 °С; температура охлаждающей воды не более 25 °С у входа в охладитель.

Класс напряжения трансформатора устанавливают по классу напряжения его обмотки ВН.

Основными парами обмоток трехобмоточных трансформаторов принимаются обмотки ВН и СН.

Структурная схема условного обозначения трансформатора



Для автотрансформаторов при классах напряжения стороны СН или НН 110 кВ и выше после класса напряжения стороны ВН через черту дроби указывают класс напряжения стороны СН или НН.

Буквенная часть условного обозначения трансформатора.

Буквенная часть должна соответствовать следующему порядку обозначений:

- А – автотрансформатор;
- О или Т – однофазный или трехфазный трансформатор;
- Р – расщепленная обмотка НН;
- буквы условного обозначения видов охлаждения – по таблице 4.1;
- З – трансформатор с естественным масляным охлаждением или с охлаждением негорючим жидким диэлектриком с защитой при помощи азотной подушки без расширителя;
- Л – трансформатор с литой изоляцией;
- Т – трехобмоточный трансформатор (для двухобмоточного трансформатора букву не указывают);
- Н – трансформатор с РПН.

В НД на конкретные трансформаторы после букв, перечисленных выше, могут быть предусмотрены дополнительные буквенные обозначения, такие как:

- Б – трансформатор для питания буровых установок;
- В – трансформатор с горизонтальным расположением вводов;
- Г – трансформатор с гофробаком;
- Д – трансформатор для питания электродегидраторов;
- Ж – трансформатор для железных дорог;
- З – трансформатор защищенный (с азотной защитой);
- К – трансформатор с кабельными вводами;
- Л – трансформатор с литой изоляцией;
- М – трансформатор для металлургического производства;
- Н – трансформатор с негорючим диэлектриком (мидель, силикон, т.д.);
- П – трансформатор передвижной для железных дорог;
- П – трансформатор печной;
- П – трансформатор преобразовательный;
- С – трансформатор для собственных нужд генерирующих станций;
- С – трансформатор сухой;
- У – трансформатор усиленный к толчкам нагрузки;
- Ф – трансформатор с форсированной системой охлаждения;
- Ш – трансформатор шахтный;
- Э – трансформатор для питания электропривода.

Пример условного обозначения трансформатора – ТРДН – 40 000/110 – трехфазный двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения, с масляным охлаждением, с дутьем и естественной циркуляцией масла, с РПН, с номинальной мощностью 40 000 кВ·А, класса напряжения 110 кВ.

РАЗДЕЛ 2

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Асинхронный двигатель – самый распространенный тип двигателя в промышленности и в быту. Этим он обязан простой и надежной конструкции, неприхотливости к условиям работы, значительному ресурсу работы. На сегодня это самая распространенная в мире электрическая машина как по количеству, так и по потребляемой мощности. И хотя формально асинхронная машина может работать как в режиме двигателя, так и генератора, ее основное назначение – это двигатель.

На долю асинхронных двигателей приходится не менее 80% всех электродвигателей, выпускаемых промышленностью, – это и трехфазные и однофазные машины, а также другие машины специального назначения с асинхронным принципом действия. Благодаря хорошим эксплуатационным свойствам, простоте в обслуживании и конструкции, надежности в работе и невысокой стоимости более всего распространены трехфазные асинхронные двигатели.

В свою очередь, большинство используемых электрических двигателей являются асинхронными, имеющими короткозамкнутый ротор. Их широкое применение также обусловлено простотой в обслуживании, эксплуатации, простотой конструкции, низкой стоимостью и высокой надежностью. Что касается недостатков, то эти машины имеют относительно малый пусковой момент и большой пусковой ток, они чувствительны к изменениям параметров в сети, и имеются определенные трудности регулирования скорости вращения. Помимо этого асинхронные двигатели потребляют из сети реактивную мощность.

Благодаря специальной конструкции ротора (фазный ротор) в цепь ротора можно вводить дополнительные сопротивления, что снижает пусковой ток и увеличивает пусковой момент. Но из-за усложненной конструкции и увеличения стоимости применение данных электродвигателей ограничено. В основном их применяют как приводы механизмов с тяжелыми пусковыми условиями.

ГЛАВА 5. ОБРАЗОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Преамбула. В основе работы абсолютно любой электрической машины лежит общий принцип – взаимодействие двух магнитных полей (двух магнитов). Если один магнит вращается с некоторой скоростью – n , то благодаря взаимному притяжению магнитных полюсов второй магнит станет вращаться с такой же скоростью. Один из магнитов создается обмотками, включенными в сеть, будем называть его первичным, второй магнит – вторичный – создается на вращающейся части машины (роторе). Поэтому принцип работы электрической машины зависит только от способа создания второго магнита.

Ниже обсуждается вопрос создания вращающегося магнита (магнитного поля) неподвижными обмотками, подключенными к сети. Эта техническая проблема была решена в 1888 г. независимо друг от друга итальянским физиком Г. Феррарисом и сербским физиком-инженером Н. Теслой.

5.1. Принцип образования вращающегося магнитного поля и его параметры

Для того чтобы неподвижные обмотки создали вращающееся магнитное поле, нужно выполнить три условия:

- 1) должно быть не менее двух обмоток;
- 2) оси обмоток должны быть сдвинуты в пространстве относительно друг друга;

3) токи в обмотках должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга (это временной фазовый сдвиг).

Первоначально эффект вращения магнитного поля был открыт для двух обмоток с использованием двухфазного тока, но несколько позже был предложен трехфазный ток, обеспечивший наилучшие технико-экономические показатели современной электротехники и энергетики.

На рисунке 5.1 изображен поперечный разрез статора трехфазной машины переменного тока. Обмотки пространственно сдвинуты относительно друг друга на 120° , и они промаркированы, т. е. указаны их начала A, B, C и концы X, Y, Z. На примере этой конструкции покажем, что при подключении этой обмотки к сети трехфазного напряжения появится вращающееся магнитное поле.

В обмотке появляется трехфазный синусоидальный ток, который на рисунке 5.1 (а) представлен симметричной звездой векторов.

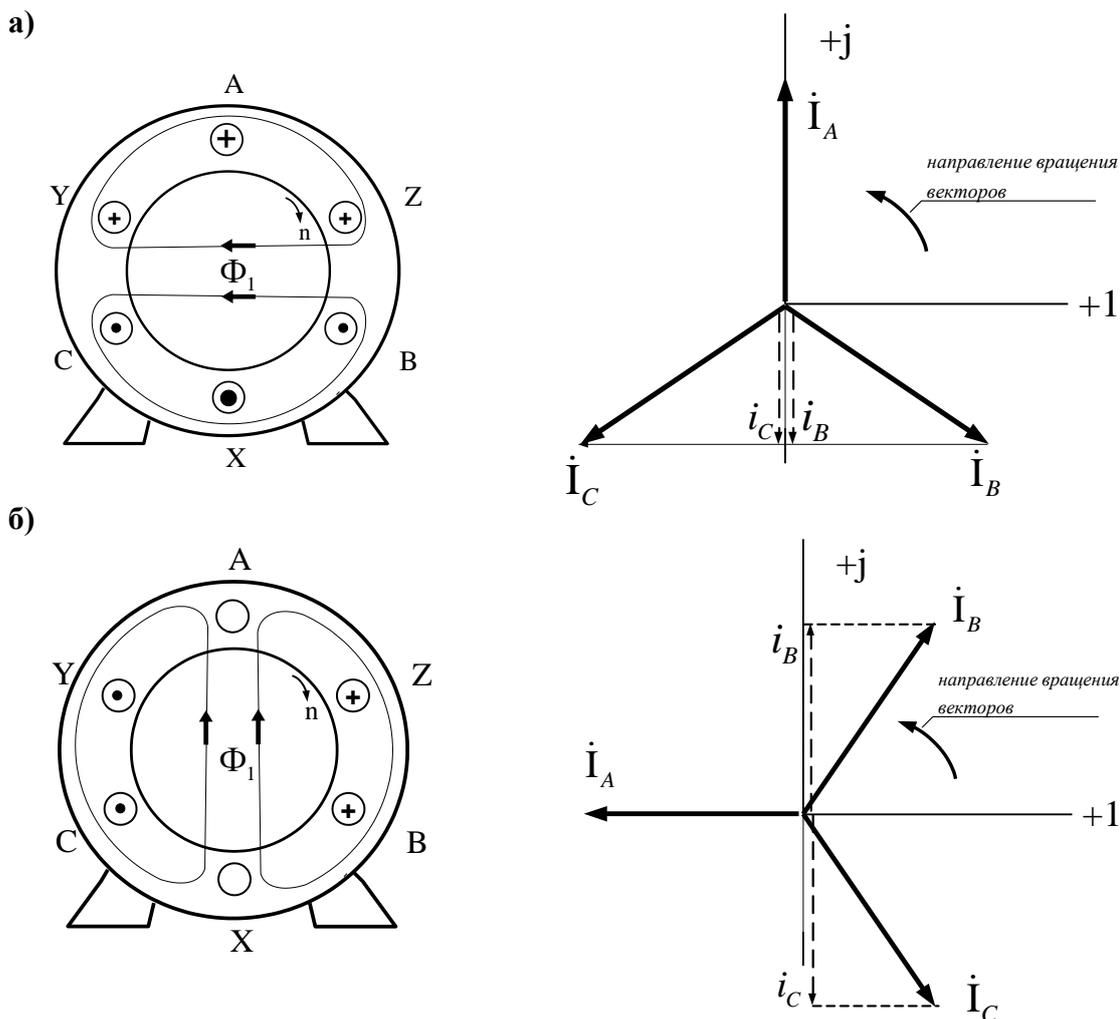


Рис. 5.1. Разрез статора машины переменного тока и векторные диаграммы трехфазного тока, поясняющие эффект вращения магнитного поля

Далее определим мгновенные значения токов в проводниках обмотки статора в любой произвольный момент времени. Для этого делаем следующее:

1) проектируем вектора токов на мнимую ось и принимаем условие: например, считаем, что при положительной проекции вектора тока он течет в обмотке от начала к концу, и ставим в проводнике направление тока «+»;

2) вращаем звезду токов против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$ (это означает, что при частоте сети 50 Гц звезда токов вращается со скоростью 50 об/с). И рассматриваем несколько моментов времени.

Пусть в начальный момент времени звезда токов расположена так, как показано на рисунке 5.1 (а). Это дает следующее распределение токов в проводниках: в фазе А ток максимален и направлен от нас – ставим (+), тогда в фазе Х ставим (-). Направления токов в остальных фазах читатель без труда определит сам. Полученное распределение токов в обмотке статора позволяет построить силовые линии магнитного поля, для чего достаточно воспользоваться известным правилом «правого винта» (или правилом «буравчика»).

Поскольку звезда токов вращается, то через некоторое время она повернется и займет новое положение, показанное на рисунке 5.1 (б). После проектирования векторов тока получим новое распределение токов в обмотке статора и новое положение магнитного поля.

Этого достаточно, чтобы сделать следующие выводы:

1. При повороте звезды токов на 90° магнитное поле тоже повернулось на 90° электрических, значит, за один оборот звезды токов поле тоже сделает один оборот. При частоте сети 50 Гц магнитное поле будет вращаться со скоростью 50 об/с или 3 000 об/мин. Амплитуда результирующего магнитного поля в процессе вращения остается неизменной по величине, т. е. трехфазная обмотка создает в машине круговое вращающееся магнитное поле.

2. Направление вращения магнитного поля зависит от порядка чередования фаз. При прямом чередовании фаз напряжения сети $A \rightarrow B \rightarrow C$ магнитное поле в машине вращается в прямом направлении, т. е. от фазы А к фазе В и к фазе С (предлагаем читателю самостоятельно доказать, что при обратном чередовании фаз $A \rightarrow C \rightarrow B$ направление вращения поля тоже изменится на обратное).

Параметры вращающегося магнитного поля. Воспользуемся изображением магнитного поля на рисунке 5.2 (а). На линии «а-а» магнитное поле равно нулю, эта линия делит магнитное поле на два полюса: северный – N и южный – S. Для наглядности развернем статор в линию (рис. 5.2 (б)) и введем для магнитного поля принятые в мировой практике обозначения:

- τ – полюсное деление (длина дуги по внутренней расточке статора), занимаемое одним полюсом;
- p – число пар полюсов (для поля, изображенного на рисунке 5.2, $p = 1$).

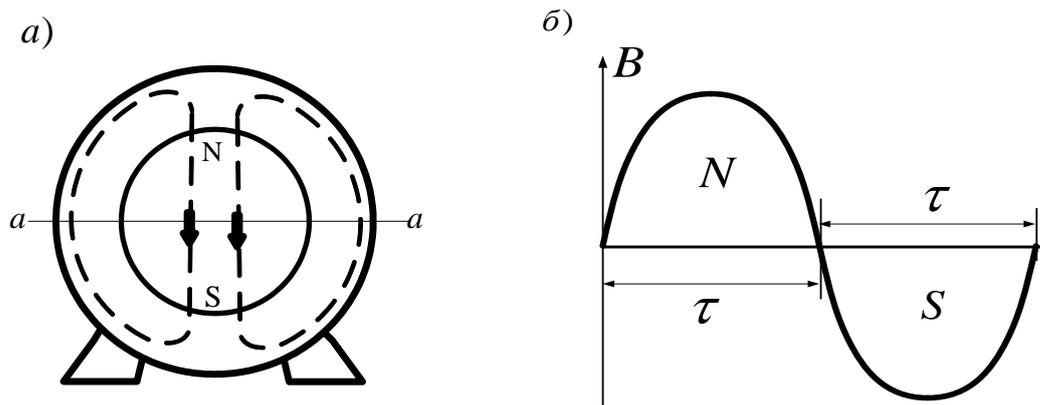


Рис. 5.2. Магнитное поле статора при $p = 1$ (а) и его развертка в линию (б)

Скорость вращения магнитного поля. При повороте звезды токов на один оборот – это 360 электрических градусов, магнитное поле поворачивается на одну пару полюсов. Таким образом:

- при $p = 1$, $n = f/1$ – один оборот звезды токов дает один оборот поля;
- при $p = 2$, $n = f/2$ – один оборот звезды токов дает 1/2 оборота поля;
- при $p = 3$, $n = f/3$ – один оборот звезды токов дает 1/3 оборота поля.

Отсюда следует формула для определения скорости вращения магнитного поля:

$$n = \frac{f}{p} \text{ об/с,} \quad \text{или} \quad n = \frac{60f}{p} \text{ об/мин.} \quad (5.1)$$

Эта формула дает стандартный ряд скоростей вращения магнитного поля для электрических машин переменного тока, работающих на частоте 50 Гц, часть этого ряда приведена ниже.

Число пар полюсов	n, об/мин
p = 1	3 000
p = 2	1 500
p = 3	1 000
p = 4	750
p = 5	600
p = 6	500

5.2. Обмотки машин переменного тока

Общие сведения о трехфазных обмотках. Для укладки обмотки на внутренней рашточке статора в нем выполняются пазы, расстояние между пазами называется зубом. Совместно паз и зуб образуют зубцовое деление. Формы сечения пазов статора зависят от напряжения обмотки статора и мощности машины и подразделяются на полузакрытые, полуоткрытые, открытые. Примеры сечения пазов статора машин переменного тока показаны на рисунке 5.3.

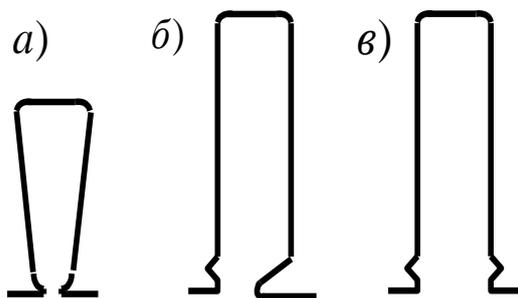


Рис. 5.3. Профили пазов статора:

- а) полузакрытый,
- б) полуоткрытый,
- в) открытый

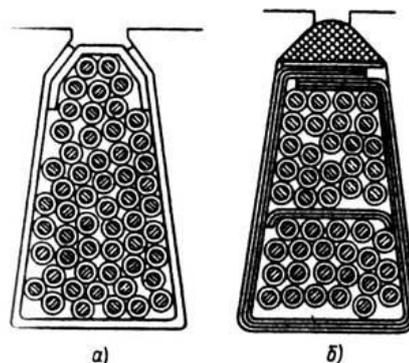


Рис. 5.4. Поперечное сечение полузакрытых пазов статора:

- а) однослойная обмотка;
- б) двухслойная обмотка

Полузакрытые пазы (рис. 5.4) применяют в машинах мощностью до 100 кВт и напряжением до 650 В. Обмотка изолируется от стенок паза посредством пазовой коробочки из электротехнического картона и синтетической пленки. В изолированные пазы всыпается мягкая обмотка, проводники по одному опускаются через щель паза. Если сечение фазы больше сечения одного проводника, то обмотка собирается из нескольких параллельных ветвей. Если и эта мера недостаточна, то каждый виток выполняется из нескольких параллельных проводников. Плотность тока в таких обмотках выбирают в пределах 5–7 А/мм².

Полуоткрытые пазы применяют в машинах средней мощности 200–400 кВт и напряжения до 650 В. Катушки в таких машинах наматываются из прямоугольного провода на соответствующих шаблонах. Плотность тока выбирают в пределах 4–5 А/мм².

Открытые пазы применяют в машинах большой мощности. Обмотка выполняется из проводников прямоугольного сечения, и катушки изолируются еще до укладки.

Во всех типах пазов статора обмотки укрепляют в пазах с помощью клиньев. В качестве материала клиньев используют промасленное дерево (бук), вулканизированную фибру, для машин средней и большой мощности используют текстолит или стеклотекстолит.

Для трехфазной обмотки статора введено понятие «фазная зона». Фазная зона может включать в себя один или несколько пазов, их количество обозначают буквой – q . С увеличением числа q становится более равномерным распределение обмотки по расточке статора, что улучшает форму кривой индукции магнитного поля. На рисунке 5.5 показана обмотка с фазной зоной, состоящей из трех пазов: $q = 3$.

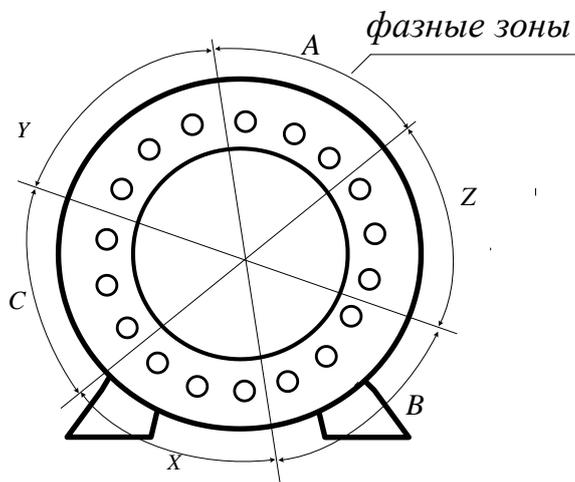


Рис. 5.5. Иллюстрация фазных зон трехфазной машины с параметрами обмотки: $p = 1$, $z = 18$, $q = 3$

Таким образом, при конструировании и расчете трехфазной обмотки используются следующие параметры:

- z – число пазов (или зубцов) сердечника, в которых располагается обмотка;
- m – число фаз обмотки (далее упоминаются обмотки с $m = 3$);
- $2p$ – число полюсов обмотки;
- q – число пазов на полюс и фазу (число пазов в фазной зоне).

Между этими параметрами существует очевидная связь:

$$z = 2mpq \quad \text{или} \quad q = \frac{z}{2mp}.$$

Виток и катушка обмотки. Виток – это простейший элемент обмотки, который состоит из двух последовательно соединенных проводников, размещенных в пазах, находящихся под соседними разноименными полюсами (рис. 5.6).

Часть витка, которая лежит в пазу, является его активной частью, т. к. именно в ней наводится ЭДС от главного магнитного поля машины. Остальная часть витка располагается по торцам магнитопровода, и ее называют лобовой частью витка. Проводники, образующие виток, могут состоять из нескольких параллельных проводов, к этому прибегают, чтобы сделать обмотку мягкой и облегчить ее укладку в пазы.

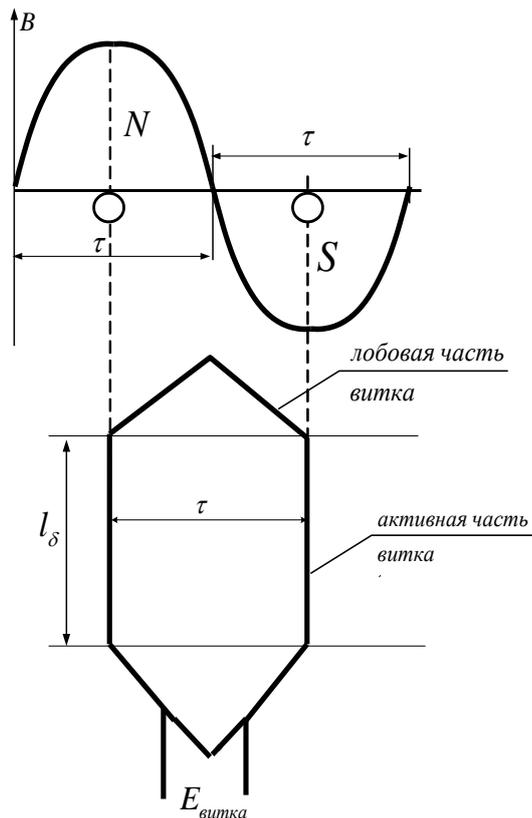


Рис. 5.6. К определению элементов витка и катушки

Один или несколько последовательно соединенных витков образуют катушку или секцию обмотки. Если секция состоит из одного витка, то такую обмотку называют стержневой, т. к. в этом случае находящиеся в пазах проводники обычно представляют собой жесткие стержни. Обмотка, состоящая из многovitковых секций, называется катушечной.

Катушка (или секция обмотки) характеризуется числом витков – w_c и шагом – y , т. е. количеством охватываемых ею зубцов магнитопровода. Так, например, если одна сторона катушки (секции) лежит в первом пазу, а вторая – в шестом, то катушка охватывает пять зубцов, и ее шаг равен пяти: $y = 5$.

Шаг катушки называют диаметральной, если он равен полюсному делению – τ . В этом случае:

$$y = \tau = z/2p.$$

Если шаг катушки меньше условно диаметрального, то его называют укороченным. Укорочение шага характеризуется коэффициентом укорочения:

$$k_y = y/\tau.$$

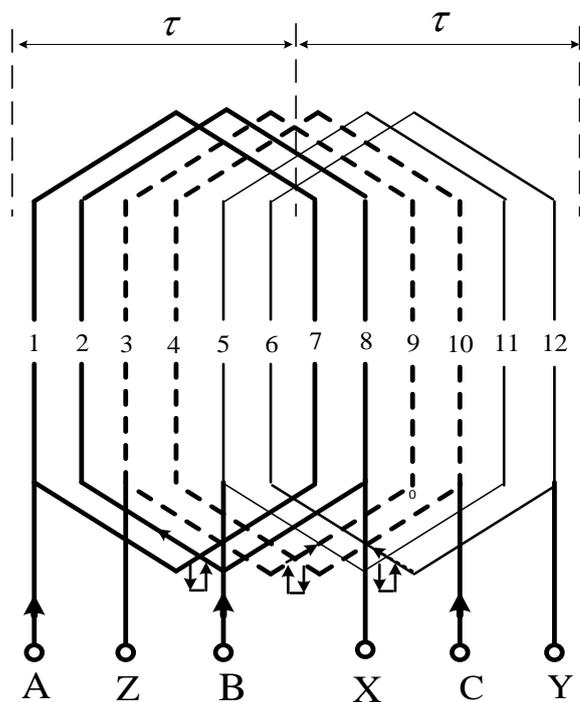
Классификация обмоток. Обмотки машин переменного тока делятся на однослойные и двухслойные. В современных машинах применяются преимущественно двухслойные обмотки.

Однослойные обмотки классифицируются по технологии изготовления катушек и делятся на концентрические и шаблонные обмотки.

Концентрические однослойные обмотки имеют катушечные группы, состоящие из концентрических катушек, причем количество групп в каждой фазе равно числу пар полюсов. Недостатки концентрической катушечной обмотки – увеличение размеров лобовых

частей и сложность их выполнения. В настоящее время концентрические однослойные обмотки применяются редко.

Шаблонные обмотки имеют катушки одинаковой формы и ширины и наматываются на одном шаблоне. Для удобства укладки катушки шаблонной обмотки имеют форму трапеции. Схема простой шаблонной обмотки представлена на рисунке 5.7.



Параметры

однослойной обмотки:

$$m=3,$$

$$p=1,$$

$$z=12,$$

$$q=2,$$

$$k_{\text{ук}} = \frac{6}{6} = 1.$$

Рис. 5.7. Схема трехфазной простой шаблонной обмотки

Двухслойные обмотки. В двухслойных обмотках стороны катушек лежат в пазах в два слоя. У каждой катушки одна сторона лежит в верхнем слое, другая в нижнем слое. При этом все катушки имеют одинаковые размеры и форму, что упрощает технологию их изготовления. Двухслойные обмотки обеспечивают следующие преимущества:

- 1) возникает возможность укорочения шага на любое число зубцовых делений, что обеспечивает подавление высших гармоник ЭДС;
- 2) экономится обмоточный провод за счет более коротких лобовых частей;
- 3) упрощается изготовление и укладка в пазы.

Двухслойные обмотки делятся на петлевые и волновые, они равноценные в электромагнитном отношении, но по технологическим критериям преимущественно применяют петлевые обмотки.

В большинстве случаев применяют трехфазные обмотки с фазной зоной 60° и редко – с фазной зоной 120° .

Обмотки могут иметь как целое, так и дробное число пазов на полюс и фазу. Последние обмотки называются дробными, и далее они не обсуждаются.

Пример петлевой двухслойной обмотки (рис. 5.8). Рассмотрим трехфазную двухполюсную обмотку $2p = 2$ с числом пазов $Z = 12$.

Определим число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2$$

и величину полюсного деления в зубцовых делениях:

$$\tau = mq = 3 \cdot 2 = 6.$$

Выберем укороченный шаг обмотки $y = 5$ зубцовых делений и определим коэффициент укорочения:

$$k_y = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6} = 0,833.$$

Поясним порядок составления схемы обмотки, которая изображена на рисунке 5.8. Сначала распределим верхние стороны катушек по фазным зонам по 2 пазов в каждой зоне, т. к. $q = 2$. Назначим пазы 1 и 2 для зоны фазы А.

Так как фазная зона В относительно зоны А сдвинута на 120° , т. е. на две зоны по 60° (или на 4 пазов), то зоне В нужно отвести пазы:

$$1 + 4 = 5 \quad \text{и} \quad 2 + 4 = 6.$$

Фазная зона С сдвинута относительно зоны В на 120° , и поэтому она займет пазы:

$$5 + 4 = 9 \quad \text{и} \quad 6 + 4 = 10.$$

Таким образом, распределили половину фазных зон и пазов верхнего слоя.

Далее распределим фазные зоны X, Y, Z. Для зоны X, принадлежащей фазе А, отводим пазы, сдвинутые относительно зоны А на $\tau = 6$ пазов, т. е. пазы:

$$1 + 6 = 7 \quad \text{и} \quad 2 + 6 = 8.$$

Аналогично выделим пазы для зоны Y:

$$5 + 6 = 11 \quad \text{и} \quad 6 + 6 = 12,$$

а также пазы для зоны Z:

$$9 - 6 = 3 \quad \text{и} \quad 10 - 6 = 4.$$

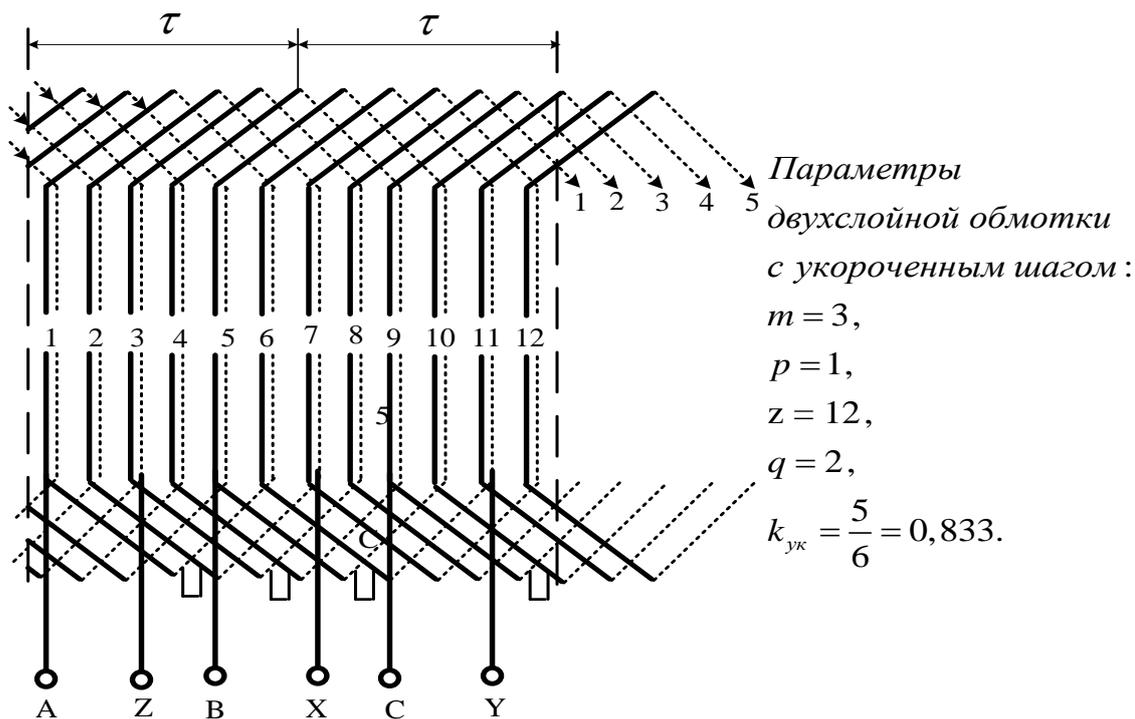


Рис. 5.8. Схема трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом

Поскольку в этой схеме шаг укорочен на одно зубцовое деление, нижние стороны катушек будут сдвинуты на одно зубцовое деление влево.

5.3. Способы улучшения формы ЭДС в обмотках статора и ротора

Суть проблемы. При конструировании машин переменного тока конструкторы стремятся ЭДС, индуцируемые в обмотках, сделать синусоидальными. А поскольку ЭДС индуцируются вращающимся магнитным полем, то необходимо, чтобы и распределение магнитной индукции вдоль статора было тоже синусоидальным. Однако получить чисто синусоидальное магнитное поле в машине теоретически невозможно по ряду причин, основными из которых являются:

- 1) наличие пазов в статоре, что приводит к неравномерному зазору вдоль расточки статора;
- 2) дискретное распределение обмотки статора по пазам.

Таким образом, магнитное поле в машинах переменного тока всегда содержит кроме основной (рабочей) гармоники также и высшие гармоники, которые индуцируют в обмотках машины дополнительные ЭДС и вызывают ухудшение их характеристик. Поэтому меры по улучшению характеристик машин направлены в основном не на улучшение формы поля, а на подавление высших гармоник ЭДС. К таким мерам относятся:

- 1) укорочение шага обмотки статора;
- 2) увеличение числа пазов на полюс и фазу $q > 1$;
- 3) увеличение пазов статора.

Укорочение шага обмотки статора. Если обмотка имеет полный шаг, в ней будут индуцироваться все нечетные гармоники $\nu = 1, 3, 5, 7$ и т.д. Первая гармоника – это рабочая гармоника, а остальные создают дополнительные потери, ухудшая параметры машины, и поэтому их необходимо максимально ослаблять. Рассмотрим методы подавления отдельных групп гармоник.

Гармоники, кратные трем, $\nu = 3, 9, \dots$ Так как ЭДС третьей гармоники во всех фазах обмотки совпадают по фазе и имеют одинаковую амплитуду, то их влияние на характеристики машины определяется схемой соединения обмотки (рис. 5.9).

При схеме обмотки «звезда» с изолированной нейтралью ЭДС третьей гармоники появляются, но ток этой гармоники существовать не может, поэтому гармоники, кратные трем, не влияют на характеристики машины.

При схеме обмотки «треугольник» ЭДС гармоники $\nu = 3$ складываются и создают ток третьей гармоники, который циркулирует по замкнутому треугольнику и вызывает дополнительные потери и нагрев обмотки.

В подавляющем большинстве случаев обмотки статора машин переменного тока соединяют по схеме «звезда», и поэтому при конструировании этих машин особое внимание обращают на подавление гармоник, не кратных трем.

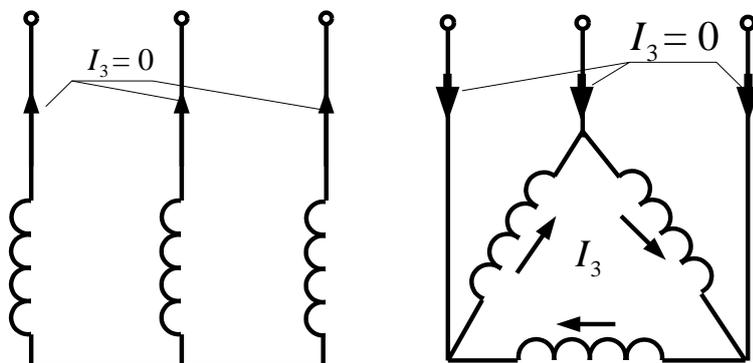


Рис. 5.9. К вопросу о существовании токов третьей гармоники в схемах «звезда» и «треугольник»

Гармоники $\nu = 5, 7$. Поскольку амплитуда гармоник обратно пропорциональна их номеру, то ощутимое влияние оказывают только пятая и седьмая гармоники, и поэтому

при конструировании машин обращают внимание на максимальное подавление именно этих гармоник. Основным методом подавления ЭДС таких гармоник является укорочение шага обмотки.

Покажем, что выбором шага обмотки можно полностью подавить ЭДС любой определенной гармоники, и сделаем это на примере гармоники $\nu = 5$.

На рисунке 5.10 показано взаимное расположение гармоник индукции магнитного поля: первой гармоники $\nu = 1$ и пятой гармоники $\nu = 5$. Из рисунка видно, что при полном шаге обмотки ЭДС пятой гармоники в активных сторонах витка складываются, и в результате амплитуда пятой гармоники максимальна:

$$E_{5в} = E'_5 + E''_5 = 2E_5.$$

Но если шаг обмотки укоротить на $1/5$, то ситуация изменится: ЭДС пятой гармоники в активных сторонах витка направлены одинаково и поэтому взаимно уничтожают друг друга, в результате $E_{5в} = 0$.

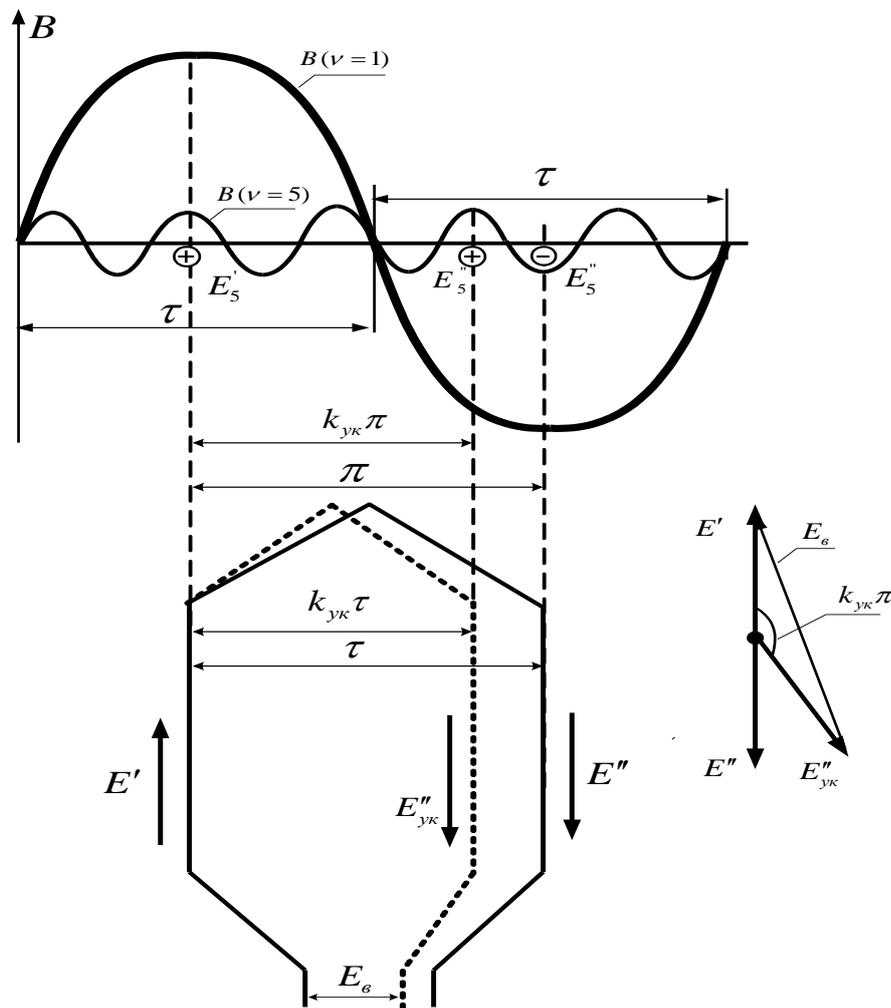


Рис. 5.10. ЭДС витка с полным и укороченным шагом

Однако укорочение шага вместе с положительным эффектом дает и отрицательный эффект. Как видно из векторной диаграммы, приведенной на рисунке 5.10, при укорочении шага обмотки происходит также и уменьшение ЭДС рабочей гармоники:

$$E_6 = E' + E'' = 2E_{пр} \sin \frac{k_y \pi}{2}.$$

Вывод. Для полного уничтожения гармоники $\nu = 5$ шаг обмотки нужно укоротить на $\frac{1}{5}\tau$, т. е. шаг обмотки должен быть:

$$k_y = 4/5 = 0,80.$$

По аналогии для полного уничтожения гармоники $\nu = 7$ шаг обмотки нужно укоротить на $\frac{1}{7}\tau$, т. е. шаг обмотки должен быть:

$$k_y = 6/7 = 0,86.$$

Очевидно, что достичь одновременно полного уничтожения пятой и седьмой гармоник невозможно, поэтому для максимального ослабления обеих гармоник шаг обмотки следует укоротить на $\frac{1}{6}\tau$, т. е. шаг обмотки должен быть:

$$k_y = 5/6 = 0,833.$$

Так как укорочение шага возможно только на целое число зубцовых делений, то не всегда можно получить $k_y = 5/6$, и обычно берут $k_y = 0,8 - 0,86$.

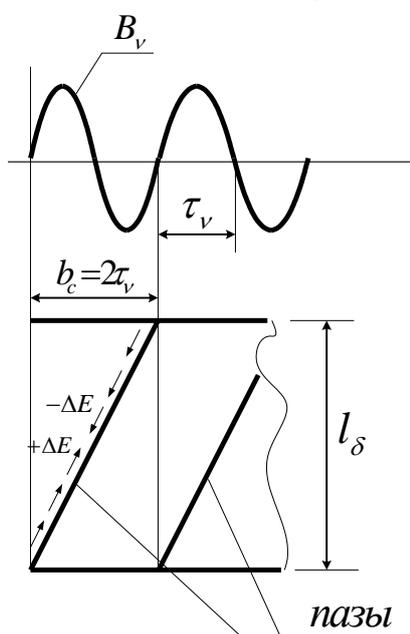


Рис. 5.11. Компенсация ЭДС зубцового порядка скосом паза на зубцовое деление

Скос пазов. Из теории электрических машин известно, что в структуре магнитного поля машины переменного тока существуют гармоники, уничтожение или ослабление которых не происходит ни при укорочении шага, ни при увеличении числа q . Такие гармоники называют гармониками зубцового порядка, и их номер определяется формулой:

$$\nu_z = 2mqk \pm 1 ,$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$

При $k = 1$ первые гармоники зубцового порядка наиболее сильные, а порядок этих гармоник близок к количеству зубцов на пару полюсов, откуда и произошло это название, и это свойство используется в машинах переменного тока для ослабления зубцовых гармоник.

Если выбрать скос пазов, равный зубцовому делению статора, то ЭДС от всех гармоник зубцового порядка существенно ослабятся или даже уничтожатся. Как видно из рисунка 5.11, уничтожение ЭДС зубцового порядка происходит потому, что на отдельных участках проводника индуктируются ЭДС, одинаковые по величине, но обратные по знаку, и, следовательно, они компенсируют друг друга.

Схемы соединения обмоток статора. При проектировании машины изоляцию обмоток статора рассчитывают на фазное напряжение. На практике предпочитают соединение трехфазных обмоток в звезду. Однако на асинхронных двигателях малой мощности указывают два номинальных напряжения, например, 380/220 В или 650/380 В. Это означает, что двигатель может использоваться в сетях с двумя номинальными напряжениями. Так как за номинальное напряжение трехфазной сети принимается линейное напряжение, то, например, для двигателя с напряжением 380/220 В, в сети 380 В обмотка должна включаться по схеме Y, а при напряжении сети 220 В – по схеме Δ. В этом случае фазное напряжение обмоток статора всегда остается номинальным, и машина в обоих случаях имеет одинаково хорошие эксплуатационные характеристики.

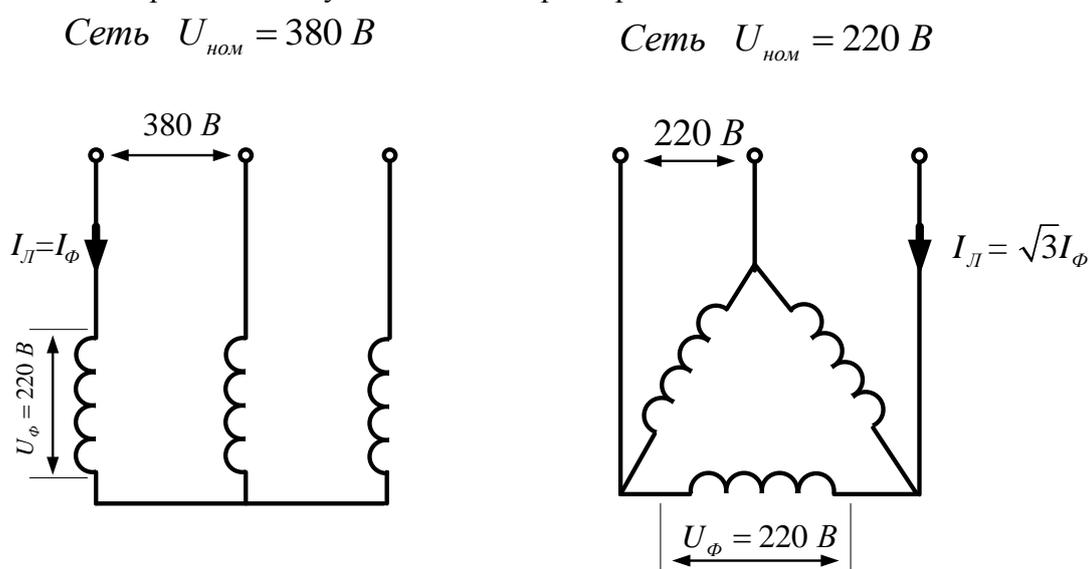


Рис. 5.12. Схемы соединения обмоток статора «звезда» и «треугольник»

При подключении одного и того же двигателя к указанным сетям по данным схемам его потребляемая мощность не изменится, т. к. в обеих схемах одинаковы как напряжение на фазе обмотки, так и ток фазы:

$$S_{ном} = 3 \cdot U_{\phi} I_{\phi} .$$

Но при этом ток, потребляемый из сети, при схеме «треугольник» будет в $\sqrt{3}$ раза больше.

5.4. Определение начал и концов обмоток статора трехфазных электрических машин

На рисунке 5.13 изображена панель вводной коробки трехфазного асинхронного двигателя, на которой выходы фаз обмотки не обозначены. Требуется промаркировать фазы и собрать в схему «звезда».

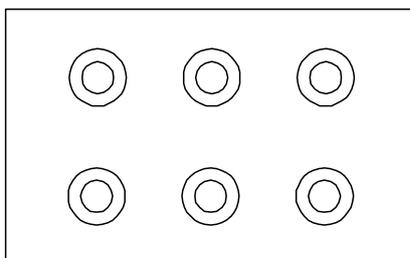


Рис. 5.13. Панель вводной коробки двигателя перед маркировкой

Шаг 1. Прозваниваем фазы с помощью омметра. Например, после прозвонки оказалось, что выводы фаз на панели расположены так, как показано ниже на рисунке 5.14.

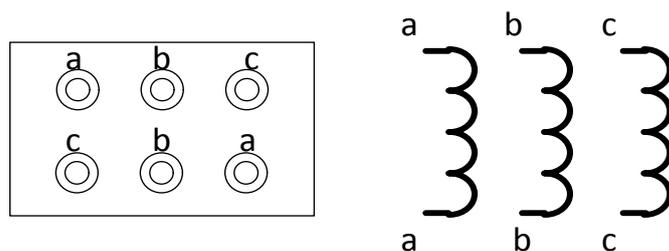


Рис. 5.14. (Расположение выводов фаз на панели вводной коробки)

Шаг 2. Теперь у этих фаз требуется определить начала и концы, т. е. промаркировать обмотки. Для этого выберем произвольно две любые фазы, например, **b–b** и **с–с**, и начнем процедуру определения начал и концов этих фаз.

Шаг 3. На фазах произвольно ставим обозначения начал (Н) и концов (К) и затем проверяем – угадали маркировку фаз или нет. Для этого собираем схему, в которой выбранные фазы включены согласно, а третью фазу **а–а** подключаем к источнику переменного напряжения $\sim 15\text{--}20\text{ В}$.

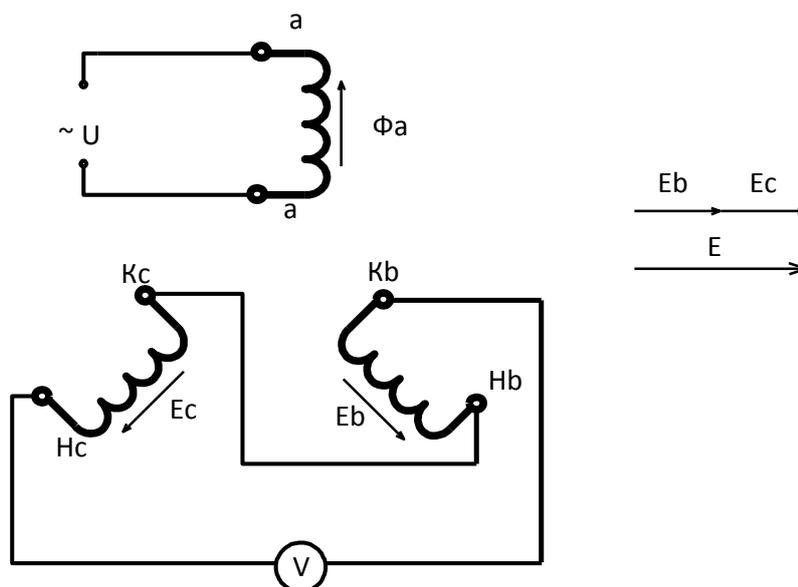


Рис. 5.15. Схема согласного соединения обмоток

После включения в сеть обмотка **а–а** создает пульсирующий магнитный поток, который в свою очередь индуцирует ЭДС в фазах **б–б** и **с–с**. Тогда при согласном включении этих обмоток ЭДС в них будут направлены одинаково, т. е. будут складываться, как это показано на рисунке 5.15, и вольтметр покажет наличие напряжения в этих фазах. Это будет означать, что маркировку начал и концов фаз **б–б** и **с–с** угадали.

А если получили значение напряжения, близкое к нулю, то необходимо поменять местами начала и концы одной из выбранных фаз, поскольку в данном случае ЭДС в фазах направлены противоположно (рис. 5.16).

На этом заканчивается процедура маркировки двух выбранных фаз, и остается промаркировать третью фазу **а–а**.

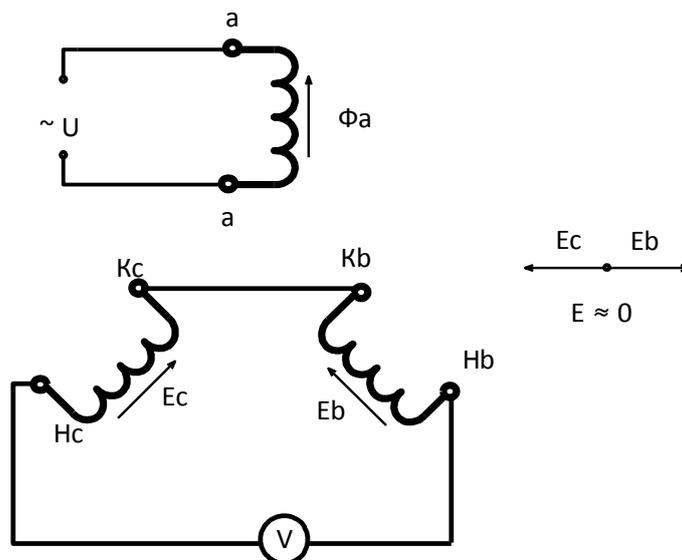


Рис. 5.16. Схема встречного включения фаз b–b и c–c

Шаг 4. Для маркировки фазы **a–a** назначаем произвольно начала и концы и собираем схему, изображенную на рисунке 5.17. Если вольтметр покажет наличие напряжения, это значит, что маркировку фазы **aa** *угадали*, а если напряжение будет равно нулю, то необходимо поменять начала и концы фазы **aa**.

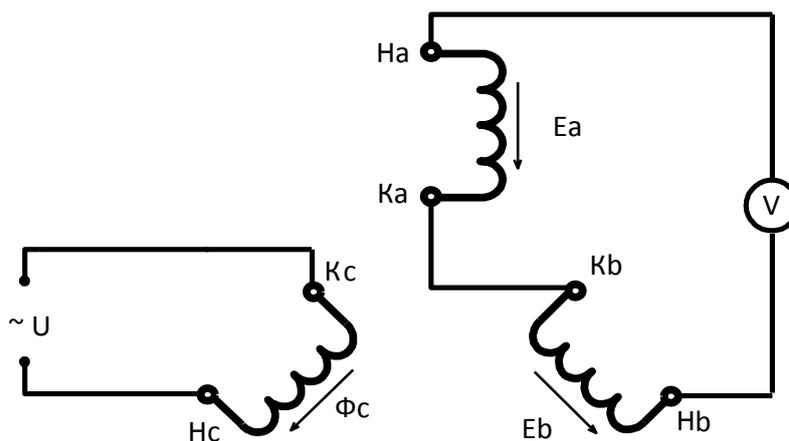


Рис. 5.17. Схема для определения начал и концов фазы **aa**

Таким образом, определены начала и концы всех фаз трехфазной обмотки асинхронного двигателя.

Если при контрольном включении двигатель вращается и не издает посторонних шумов (гула), то маркировка выполнена правильно, а если возникнет гул, значит, маркировка выполнена неверно, и ее необходимо провести заново.

ГЛАВА 6. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Асинхронная машина, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. формально она без изменения конструкции может выполнять функцию как источника (генератор), так и потребителя (двигатель) электрической энергии. Однако на практике эта машина находит свое широчайшее применение в качестве двигателя и очень редко применяется в качестве генератора. Поэтому вопросы принципа действия и конструкции асинхронной машины будем обсуждать для режима двигателя.

6.1. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя

На рисунке 6.1 представлен разрез асинхронного двигателя с указанием основных и вспомогательных элементов его конструкции.

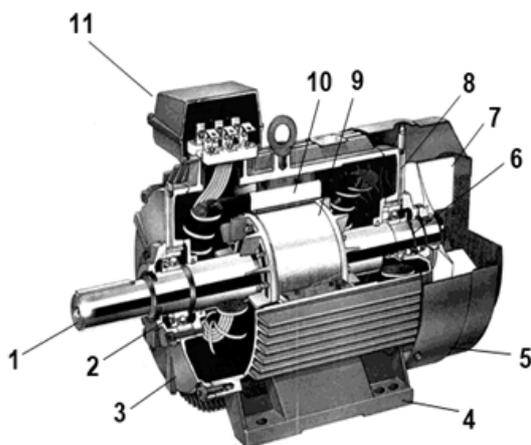


Рис. 6.1. Конструкция асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

- 1 – вал; 2, 6 – подшипники;
- 3, 8 – подшипниковые щиты; 4 – лапы;
- 5 – кожух вентилятора; 7 – крыльчатка вентилятора;
- 9 – короткозамкнутый ротор;
- 10 – статор; 11 – коробка выводов

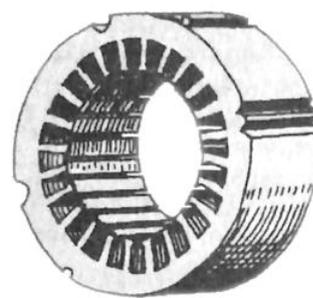


Рис. 6.2. Конструкция магнитопровода статора, набранного из листов электротехнической стали (магнитопровод шихтован)

Основными частями любого асинхронного двигателя являются неподвижная часть – статор и вращающаяся часть – ротор.

Статор трехфазного асинхронного двигателя состоит из шихтованного магнитопровода, запрессованного в литую станину. Шихтовка обеспечивает минимальные магнитные потери в стали. На внутренней поверхности магнитопровода имеются пазы для укладки проводников обмотки (рис. 6.2). Эти проводники являются сторонами многовитковых катушек. Катушки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на 120° и образуют три фазы обмотки статора. Фазы обмотки можно соединить по схеме «звезда» или «треугольник».

Роторы асинхронного двигателя бывают двух видов: короткозамкнутый и фазный.

Короткозамкнутый ротор (рис. 6.3) представляет собой сердечник, набранный из листов стали. В пазы этого сердечника заливается расплавленный алюминий (или медь), в результате чего образуются стержни, которые замкнуты накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется «белчья клетка». В двигателях большой мощности вместо алюминия может применяться медь.

Фазный ротор (рис. 6.3) имеет трехфазную обмотку, которая практически не отличается от обмотки статора. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединяются в «звезду», а свободные концы подводятся к контактным кольцам. С помощью щеток, которые подключены к кольцам, в цепь трехфазной обмотки ротора можно вводить добавочный резистор. Это нужно для того, чтобы можно было изменять активное сопротивление в цепи ротора с целью уменьшения больших пусковых токов.



Рис. 6.3. Конструкции короткозамкнутого и фазного роторов

Принцип работы асинхронного двигателя. При подключении обмотки статора на трехфазное напряжение в статоре создается магнитный поток Φ_1 , вращающийся со скоростью:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ об/мин.} \quad (6.1)$$

Эта скорость называется синхронной. Магнитный поток при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора и создает в них ЭДС. Так как обмотка ротора имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который, взаимодействуя с магнитным потоком статора, создает электромагнитный момент, стремящийся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. И если электромагнитный момент будет больше тормозного момента, то ротор станет вращаться. Скорость ротора обозначают – n . Особенностью асинхронной машины является то, что для существования в роторе ЭДС скорость ротора должна отличаться от скорости магнитного поля, чтобы постоянно происходило пересечение проводников ротора магнитным полем статора. Именно поэтому данная машина называется асинхронной.

В двигателе поле статора движется быстрее ротора, т. е. магнитное поле скользит относительно ротора. Для определения этого эффекта вводят понятие «скольжение», которое определяют по формуле:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Delta n}{n_1}, \quad (6.2)$$

или в процентах:

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%.$$

Из выражения (6.1) определяется скорость вращения ротора:

$$n = (1 - s) \cdot n_1. \quad (6.3)$$

Скольжение – это исключительно важный параметр, от которого зависят все характеристики двигателя. В момент пуска двигателя $n = 0$ и скольжение $s = 1$, но по мере разгона ротора n увеличивается, а s уменьшается. В рабочем режиме современных двигателей скольжение весьма мало и составляет всего $s \approx 0,015-0,03$, что обеспечивает хорошие эксплуатационные характеристики асинхронных двигателей.

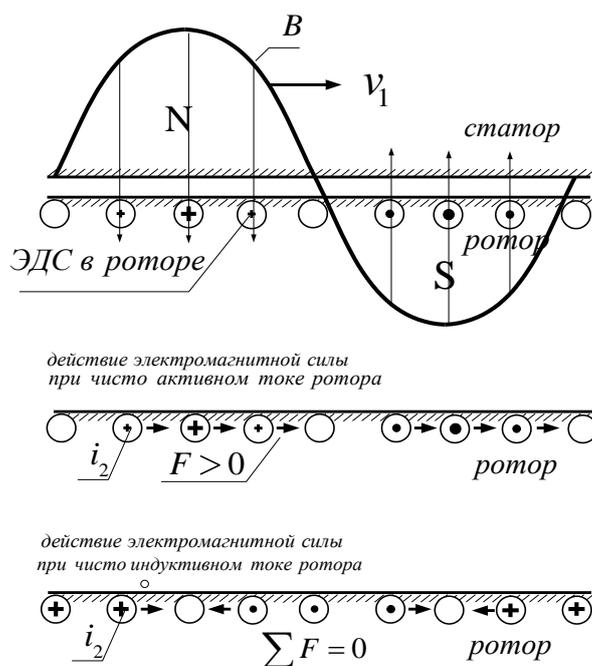


Рис. 6.4. Направление силы, действующей на ротор

Докажем утверждение о том, что на ротор действует сила в направлении движения магнитного поля. На рисунке 6.4 показана синусоидальная волна магнитного поля машины, движущаяся со скоростью v_1 , а в проводниках ротора показаны направления ЭДС, индуцируемых этим полем (направления ЭДС определены по правилу правой руки).

На этом же рисунке показаны направления токов в проводниках ротора при чисто активном токе и при чисто индуктивном токе, а также определены силы, действующие на эти проводники (направления сил произведены по правилу левой руки). Из этих рисунков следует, что вращающий момент создается только при активной составляющей тока ротора. Этот вывод носит общий характер и справедлив для всех электромагнитных устройств.

О частоте токов в роторе. При вращении ротора его проводники пересекаются магнитным полем с частотой, пропорциональной разности скоростей $\Delta n = n_1 - n$, за счет чего в роторе индуцируется ЭДС и появляется ток. Частота тока ротора f_2 определяется скоростью, с которой поле статора движется относительно ротора, т. е. Δn , тогда согласно общей формуле, определяющей скорость вращения поля (5.1), для частоты тока в роторе можем написать:

$$\Delta n = \frac{f_2}{p}$$

Из формулы (6.2) следует:

$$\Delta n = s \cdot n_1.$$

Умножив правую и левую части этого уравнения на p , получим:

$$f_2 = s \cdot f_1. \quad (6.4)$$

Вывод: частота тока ротора пропорциональна скольжению.

6.2. Схемы замещения и векторные диаграммы асинхронной машины

Преамбула. При неподвижном роторе асинхронная машина работает как трансформатор. Действительно, поступающая из сети электрическая энергия расходуется и преобразуется при таких же условиях, как и в трансформаторе: электрическая энергия обмотки статора (первичная обмотка) за вычетом в ней потерь вся превращается в электрическую энергию ротора (вторичная обмотка). Однако при вращении ротора распределение поступающей энергии отличается от трансформаторного режима. Теперь электрическая энергия, поступающая из сети, за вычетом потерь в статоре поступает в ротор и за вычетом потерь в роторе преобразуется в механическую энергию на валу машины. Таким образом, физические процессы при вращающемся роторе более сложные, чем в трансформаторе, потому что частоты токов в статоре и роторе не равны, что делает невозможным изображение первичных и вторичных электрических величин на общей векторной диаграмме.

Поэтому целью дальнейших преобразований является построение и обоснование такой математической модели асинхронной машины, в которой были бы возможны общие векторные построения для статорных и роторных процессов.

Поскольку заторможенная асинхронная машина эквивалентна трансформатору и этот режим является частным случаем ее режимного диапазона, возникает предложение: *заменим вращающуюся машину эквивалентной ей по электромагнитным и энергетическим соотношениям машиной с заторможенным ротором*. В теории асинхронных машин этот процесс называют приведением вращающейся асинхронной машины к эквивалентному режиму при неподвижном роторе⁴.

Приведение асинхронной машины к режиму заторможенного ротора. Воспользуемся следующими известными физическими фактами:

1. Электродвижущая сила в обмотке ротора пропорциональна частоте, что следует из выражения:

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot k_{\text{обм}2} w_2 ,$$

а поскольку частота в роторе равна $f_2 = sf_1$, то можно записать:

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi \cdot s \cdot f_1 \cdot k_{\text{обм}2} w_2 . \quad (6.5)$$

2. Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте:

$$x_2 = \omega L_2 = 2\pi \cdot f_2 = 2\pi \cdot s \cdot f_1 . \quad (6.6)$$

Поскольку ЭДС и индуктивное сопротивление ротора зависят от скольжения, введем следующие обозначения: в режиме заторможенного ротора ($s = 1$) обозначим E_2 и x_2 ; в режиме вращения ротора обозначим E_{2s} и x_{2s} . Тогда согласно выражениям (6.5) и (6.6) можно записать:

$$\dot{E}_{2s} = s\dot{E}_2 ,$$

$$x_{2s} = sx_2 ,$$

$$Z_{2s} = r_2 + j \cdot sx_2 .$$

Согласно закону Ома ток в роторе при его вращении будет равен:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + j \cdot sx_2} .$$

Разделим числитель и знаменатель на s и получим:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + j \cdot sx_2} .$$

⁴ *Примечание.* Возможность такого приведения обосновывается тем, что независимо от режима работы машины магнитные поля статора и ротора вращаются синхронно и всегда образуют единое поле.

Физическая трактовка последней формулы заключается в следующем: при переходе от режима вращения к режиму неподвижного ротора вторичный ток останется неизменным по амплитуде и фазе, если вместо реального сопротивления ротора r_2 будет использовано сопротивление r_2/s .

Это означает, что для приведения асинхронной машины к режиму заторможенного ротора в цепь ротора должно быть введено дополнительное активное сопротивление:

$$r_{2д} = \frac{r_2}{s} - r_2 = \frac{1-s}{s} r_2.$$

Определим физический смысл проведенных формальных преобразований, особенно физический смысл сопротивления $r_{2д}$.

Величина активной мощности, передаваемой со статора на ротор, равна:

$$P_{эм} = m_2 \cdot I_2^2 \frac{r_2}{s}.$$

Во вращающейся машине вся эта мощность распределяется на две части – на электрические потери и на механическую мощность на валу машины:

$$P_{эм} = p_{эл2} + P_{мех}.$$

Так как электрические потери в роторе равны:

$$p_{эл2} = m_2 \cdot I_2^2 r_2,$$

то механическая мощность на валу будет равна:

$$P_{мех} = P_{эм} - p_{эл2} = m_2 \cdot I_2^2 \frac{r_2}{s} - m_2 \cdot I_2^2 r_2 = m_2 \cdot I_2^2 \left(\frac{r_2}{s} - r_2 \right) = m_2 \cdot I_2^2 r_{2д}.$$

Таким образом, мощность, выделяемая в сопротивлении $r_{2д}$, равна механической мощности вращающейся машины.

Т-образная схема замещения асинхронной машины. После приведения вращающейся машины к режиму неподвижного ротора все ее электромагнитные процессы стали эквивалентны режиму трансформатора. Это позволяет к заторможенной асинхронной машине применить теоретические методы, разработанные для трансформатора. Напомним, что для построения схемы замещения трансформатора использовалась процедура приведения вторичной обмотки к первичной. Применив подобную процедуру приведения обмотки ротора к обмотке статора, получим схему замещения асинхронной машины, представленную на рисунке 6.5.

Сопротивлением намагничивающей цепи является главное индуктивное сопротивление обмотки статора, и по нему протекает намагничивающий ток:

$$\dot{I}_\mu = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2.$$

Напряжение на зажимах намагничивающей цепи равно:

$$\dot{U}_{12} = \dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = \dot{I}_\mu X_{г1}.$$

Для учета потерь в сердечнике статора на зажимы, где действует напряжение U_{12} , подключим активное сопротивление $r_{мг}$, которое определим из условия – магнитные потери в одной фазе статора равны потерям в этом сопротивлении:

$$\frac{E_1^2}{r_{мг}} = \frac{p_{мг1}}{m_1}, \quad \text{откуда} \quad r_{мг} = \frac{m_1 E_1^2}{p_{мг1}}.$$

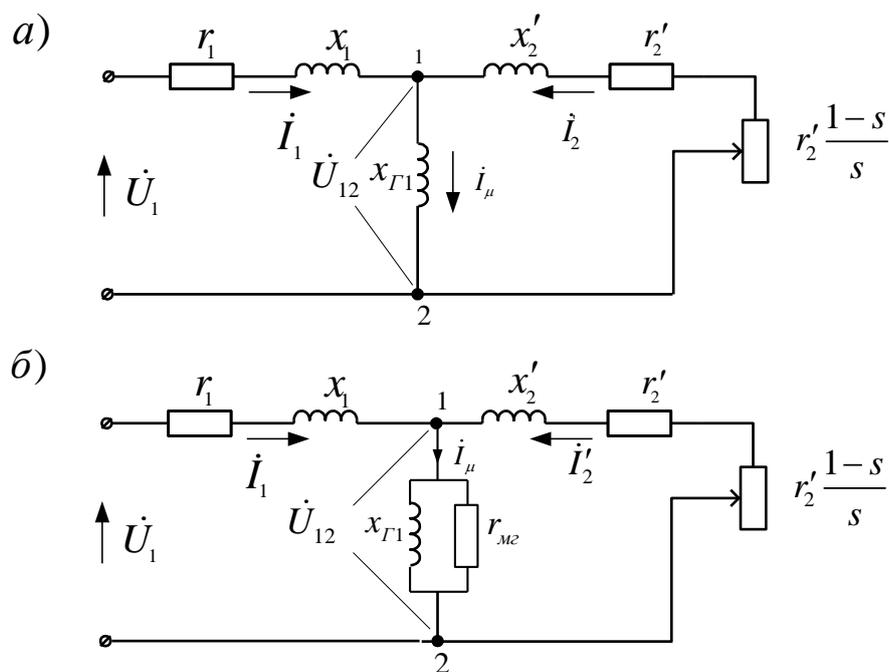


Рис. 6.5. Т-образная схема замещения асинхронной машины:
 а) без учета магнитных потерь, б) с учетом магнитных потерь

Заменим параллельно включенные сопротивления r_m и $x_{г1}$ полным комплексным сопротивлением Z_μ :

$$Z_\mu = \frac{r_1 \cdot jx_{г1}}{r_1 + jx_{г1}} = \frac{r_1 x_{г1}^2}{r_1^2 + x_{г1}^2} + j \frac{r_1^2 x_{г1}}{r_1^2 + x_{г1}^2} = r_\mu + jx_\mu,$$

в результате чего получим Т-образную схему замещения асинхронного двигателя, на основе которой можно построить векторные диаграммы для всех режимов работы машины.

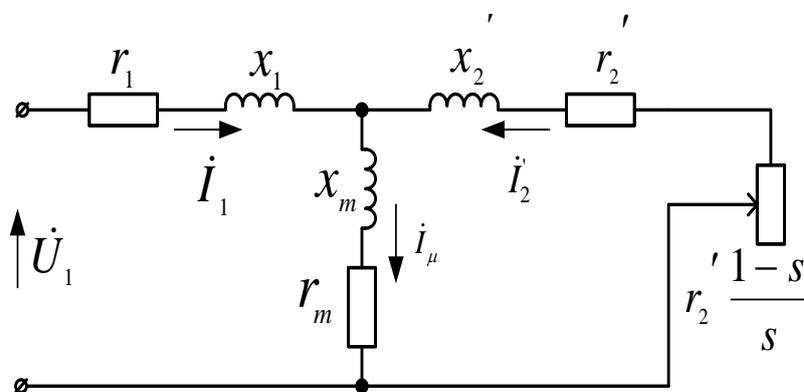


Рис. 6.6. Т-образная схема замещения асинхронной машины

Заметим, что схема замещения асинхронного двигателя аналогична схеме замещения трансформатора, но ее отличие в том, что на вторичные зажимы подключено нагрузочное сопротивление $r'_{2д}$, которое учитывает (моделирует) механическую мощность на валу машины.

Намагничивающий ток содержит реактивную составляющую, которая идет на создание магнитного поля машины, и активную составляющую, соответствующую тепловым потерям в магнитопроводе статора:

$$\dot{I}_M = \dot{I}_{Ma} + \dot{I}_{Mr} . \quad (6.7)$$

Обратим внимание на параметры намагничивающей цепи схемы замещения асинхронной машины – сопротивления намагничивающей цепи значительно меньше, чем у трансформатора, а намагничивающий ток значительно больше и составляет 25–50% от номинального тока (у силового трансформатора этот ток составляет всего 0,8–1,0%). Это объясняется наличием в намагничивающей цепи асинхронной машины воздушного зазора между статором и ротором.

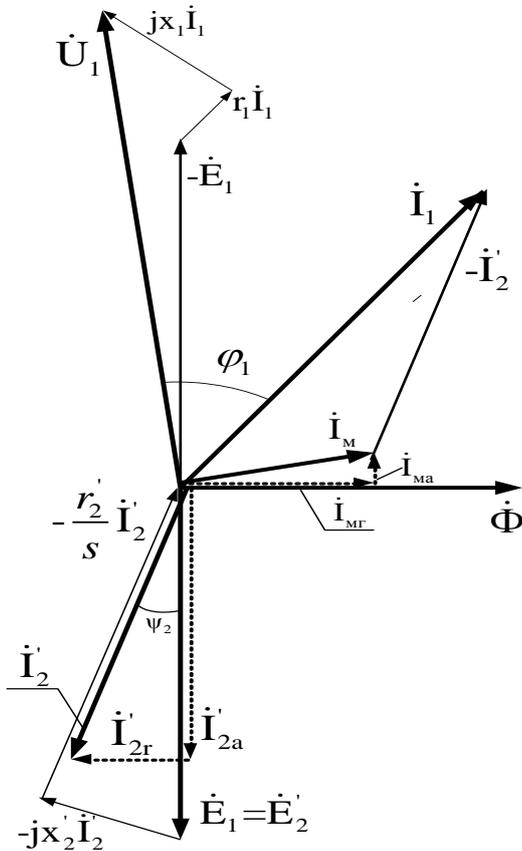


Рис. 6.7. Векторная диаграмма асинхронной машины в режиме двигателя

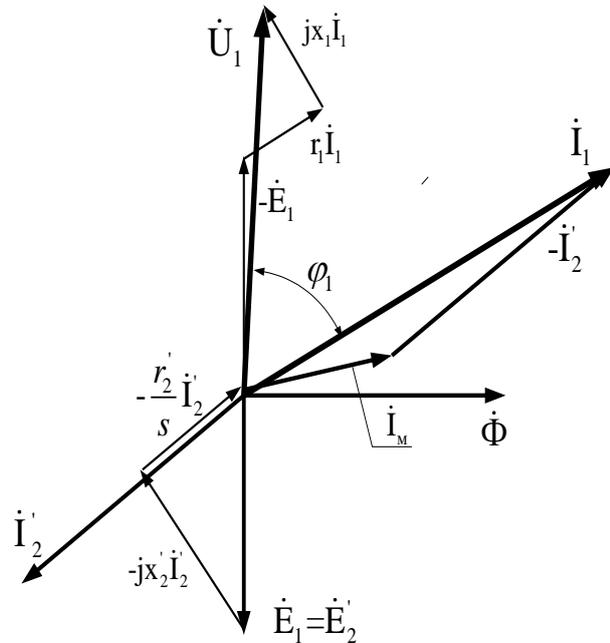


Рис. 6.8. Векторная диаграмма асинхронной машины в режиме электромагнитного тормоза

Г-образная схема замещения. Полученная выше Т-образная схема замещения асинхронной машины наиболее полно отражает характеристики машины и физические явления, происходящие в ней. Она позволяет найти точные расчетные формулы для всех величин, характеризующих электромагнитные процессы в машине. Однако для многих инженерных расчетов эта схема неудобна по той причине, что в ней имеются две параллельные ветви, в результате чего напряжение U_{12} на параллельной цепи (цепи ротора) непостоянно, т. е. изменяется при изменении нагрузки.

Более удобной в этом отношении является схема замещения, в которой зажимы параллельной цепи вынесены на зажимы питания U_1 . Для реализации этого требования нужно так преобразовать Т-образную схему, чтобы сопротивление Z_1 стало равным нулю. Для перехода от Т-образной схемы к Г-образной схеме вводится комплексный коэффициент преобразования, который представляет собой отношение напряжения, подводимого к двигателю, к ЭДС в обмотке статора:

$$c_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}_1} = 1 + \frac{Z_1}{Z_M} .$$

Величина c_1 близка к 1, поэтому на практике часто принимают значение $c_1 \approx 1$. Значение этого коэффициента приближается к единице с увеличением мощности двигателя, поэтому более точное приближение будет соответствовать более мощному двигателю.

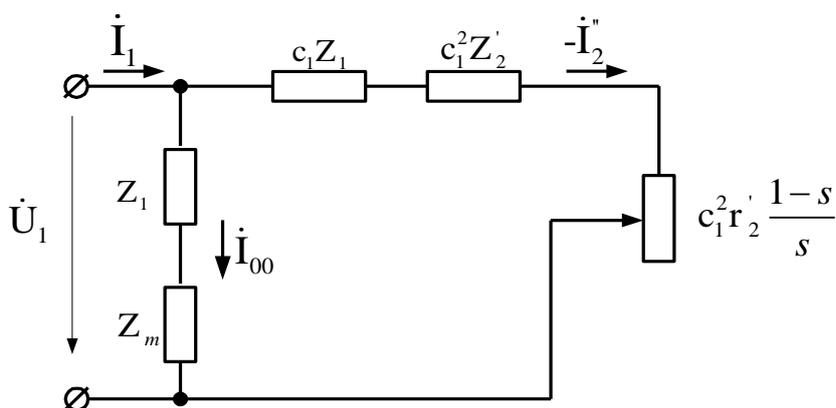


Рис. 6.9. Г-образная схема замещения асинхронной машины

Поскольку в Г-образной схеме замещения асинхронной машины намагничивающая ветвь вынесена на входные зажимы, в ней существуют две независимые друг от друга цепи: первая – намагничивающая, вторая – рабочая.

6.3. Энергетические диаграммы асинхронной машины

При работе асинхронная машина обменивается с сетью электрической мощностью:

$$\dot{S}_1 = P_1 + jQ_1, \quad (6.8)$$

где $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ и $Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1$ – соответственно активная и реактивная мощности.

При этом направление потоков мощности определяется режимом работы машины, а именно: *двигательным*, *генераторным* или *электромагнитного тормоза*. В процессе работы в различных элементах машины происходят потери мощности, и этот процесс принято иллюстрировать с помощью энергетических диаграмм.

Энергетические диаграммы активной мощности

Режим двигателя (рис. 6.10). Двигатель потребляет из сети активную мощность:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 > 0. \quad (6.9)$$

Часть этой мощности теряется в виде электрических потерь в активном сопротивлении обмотки статора:

$$p_{эл1} = m_1 (I_1)^2 r_1, \quad (6.10)$$

другая часть активной мощности теряется в виде магнитных (тепловых) потерь в сердечнике статора:

$$p_{мг1} = m_1 (I_m)^2 r_m. \quad (6.11)$$

Оставшаяся часть активной мощности представляет собой электромагнитную мощность, которая передается магнитным полем со статора на ротор:

$$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_{мг1}, \quad (6.12)$$

причем на схеме замещения этой мощности соответствует мощность, выделяемая на активном сопротивлении:

$$P_{эм} = m_1 (I_2')^2 \frac{r_2'}{s} = m_2 (I_2)^2 \frac{r_2}{s}. \quad (6.13)$$

Часть электромагнитной мощности, поступившей на ротор, теряется в виде электрических потерь в активном сопротивлении обмотки ротора:

$$p_{эл2} = m_1 (I_2')^2 r_2' . \quad (6.14)$$

Из формул (6.13) и (6.14) легко обнаружить важнейший физический факт:

$$p_{эл2} = sP_{эм} , \quad (6.15)$$

т. е. электрические потери в роторе пропорциональны скольжению. Это означает, что для получения хороших эксплуатационных характеристик рабочее скольжение машины должно быть предельно низким.

Остальная часть электромагнитной мощности превращается в механическую мощность, развиваемую на роторе:

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{эл2} = (1-s)P_{эм} , \quad (6.16)$$

или согласно схеме замещения:

$$P_{мх} = m_1 (I_2')^2 r_2' \frac{1-s}{s} . \quad (6.17)$$

Часть механической мощности теряется внутри самой машины в виде механических потерь $p_{мх}$ на вентиляцию и на трение в подшипниках, в виде магнитных потерь в сердечнике ротора $p_{мг}$ и в виде добавочных потерь p_d от высших гармоник МДС обмоток и от зубчатости статора и ротора. В результате на валу машины действует полезная механическая мощность:

$$P_2 = P_{мх} - p_{мх} - p_d .$$

Для определения мощности на валу электродвигателя используют формулу:

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9550} \text{ [кВт]} ,$$

где n – скорость вращения ротора, об/мин; M – вращающий момент, Н·м.

Сумма потерь в двигателе:

$$p_{\Sigma} = p_{эл1} + p_{мг} + p_{эл2} + p_{мх} + p_d ,$$

тогда можно записать:

$$P_2 = P_1 - p_{\Sigma} .$$

Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - p_{\Sigma}}{P_1} = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_1} .$$

Генераторный режим (рис. 6.10). В генераторном режиме активная мощность поступает в машину с вала и выдается в сеть, т. е. $P_1 < 0$. В остальном энергетическая диаграмма активной мощности будет выглядеть симметрично.

Режим электромагнитного тормоза (рис. 6.10). В этом режиме скольжение $s > 1$, т. к. ротор и магнитное поле вращаются в противоположных направлениях, при этом активная мощность поступает в асинхронную машину как из сети, так и с вала. Электрические потери в цепи ротора:

$$p_{эл2} = sP_{эм} ,$$

соответственно они больше мощности $P_{эм}$ и, следовательно, только частично покрываются за счет мощности, поступающей из сети; другая часть электрических потерь в цепи ротора

$(s-1)P_{эм}$ покрывается за счет механической мощности, приложенной к ротору. Таким образом, механическая мощность ротора будет отрицательной:

$$P_{мх} = (1-s)P_{эм}.$$

Это значит, что она не отдается ротором на вал, а подводится к нему и преобразуется в электрические потери в цепи ротора, т.е. поглощается в самой машине. Поэтому режим работы при $s > 1$ называется тормозным режимом.

Электромагнитный момент действует на ротор в направлении вращения поля, т.е. против вращения ротора и, следовательно, он является тормозящим по отношению к внешнему моменту, приложенному к валу машины.

Энергетическая диаграмма реактивной мощности асинхронной машины

Как известно, реактивная мощность расходуется на создание магнитного поля, и поскольку в конструкции асинхронной машины нет своих источников реактивной мощности, то во всех режимах машины эта мощность поступает из электрической сети. Этим объясняется единый вид энергетической диаграммы реактивной мощности для всех режимов работы машины.

Машина потребляет из сети реактивную мощность:

$$Q_1 = m_1 \cdot U_1 I_1 \cdot \sin \varphi_1,$$

и эта мощность расходуется в машине следующим образом:

1. Часть мощности идет на создание полей рассеяния обмоток статора и ротора:

$$q_1 = m_1 (I_1')^2 x_1,$$

$$q_2 = m_1 (I_2')^2 x_2' = m_2 (I_2)^2 x_2.$$

2. Остальная часть реактивной мощности идет на создание главного (рабочего) магнитного потока двигателя:

$$Q_m = m_1 (I_0)^2 x_{Г1}.$$

Из-за наличия в двигателе воздушного зазора эта мощность значительно больше, чем в трансформаторе. Увеличение реактивной мощности существенно влияет на коэффициент мощности двигателя, снижая его величину. Для асинхронных двигателей нормального исполнения $\cos \varphi_{ном} = 0,75-0,95$, с увеличением мощности двигателя $\cos \varphi_{ном}$ также увеличивается.

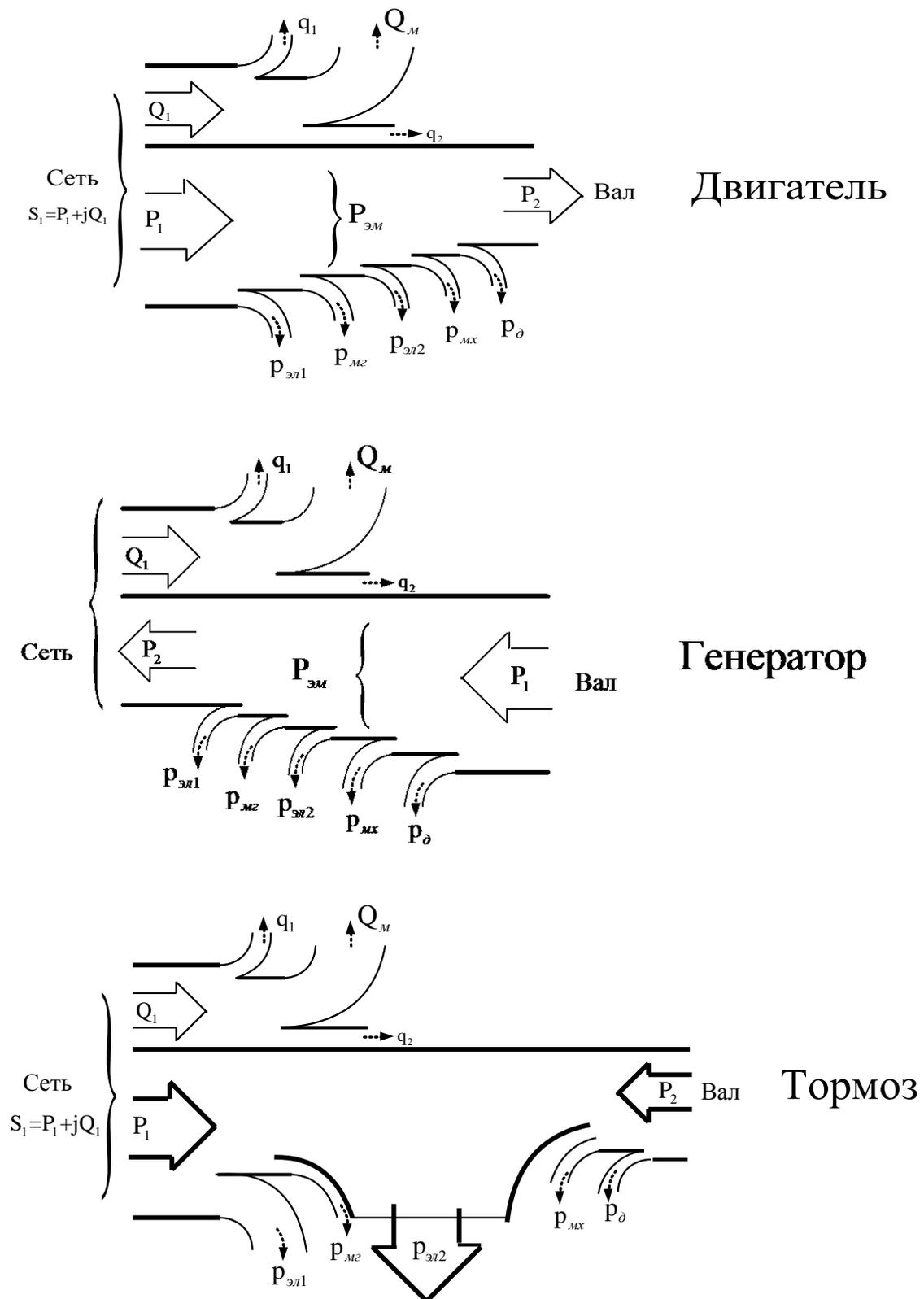


Рис. 6.10. Энергетические диаграммы асинхронной машины в режимах двигателя, генератора, электромагнитного тормоза

6.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Под рабочими характеристиками двигателя понимают зависимости потребляемой мощности – P_1 , тока в обмотке статора – I_1 , коэффициента полезного действия – η , коэффициента мощности – $\cos(\varphi_1)$, частоты вращения вала – n , момента на валу – M от мощности на валу электродвигателя – P_2 при работе с номинальным напряжением и частотой. Рабочие характеристики характеризуют эксплуатационные свойства асинхронного двигателя, позволяют правильно выбирать двигатели при проектировании электроустановок и правильно их эксплуатировать.

Графики рабочих характеристик асинхронного двигателя средней мощности представлены на рисунке 6.11. По осям абсцисс и ординат откладываются относительные величины:

$$P_{2*} = \frac{P_2}{P_{2ном}}, \quad I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1ном}}, \quad n_* = \frac{n}{n_1}, \quad \eta, \quad \cos \varphi.$$

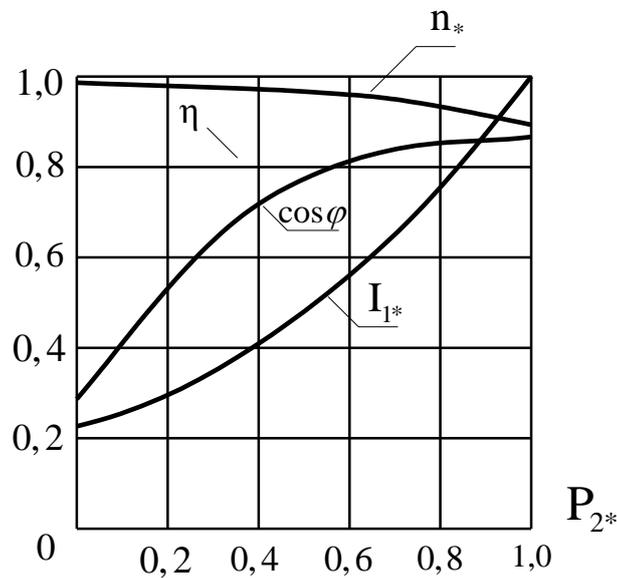


Рис. 6.11. Графики рабочих характеристик асинхронного двигателя средней мощности

ГЛАВА 7. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

7.1. Механическая характеристика асинхронной машины

Уравнение электромагнитного момента. Электромагнитная сила, действуя на ротор, создает вращающий момент:

$$M = \frac{P_{\text{мх}}}{\omega_{\text{мх}}}, \quad (7.1)$$

где $\omega_{\text{мх}} = 2\pi \cdot n$ – угловая скорость вращения ротора.

Используя формулу для скорости вращения ротора:

$$n = (1-s) n_1 = (1-s) \frac{f_1}{p},$$

определим угловую скорость ротора:

$$\omega_{\text{мх}} = 2\pi \cdot (1-s) \frac{f_1}{p} = (1-s) \frac{\omega_1}{p}, \quad (7.2)$$

и на основании формул (6.17) и (7.1) получим выражение для вращающего момента в следующем виде:

$$M = \frac{pm_1}{\omega_1} (\dot{I}_2')^2 \frac{r_2'}{s}. \quad (7.3)$$

Далее из Г-образной схемы замещения асинхронной машины определим ток ротора (по закону Ома):

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_2'}$$

и, подставив его в уравнение (7.3), получим удобное для практических расчетов выражение:

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2' / s}{\omega_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}, \quad (7.4)$$

где U_1 – фазное напряжение обмотки статора асинхронной машины.

Если в формуле (7.4) используется система единиц СИ, то электромагнитный момент выражается в н-м, для того, чтобы получить значение момента в кг-м, результат следует разделить на 9,81.

Анализ механической характеристики асинхронной машины. Внешний вид характеристики, построенной по уравнению (7.4) при $U_1 = \text{const}$, приведен на рисунке 7.1. Обсудим характерные точки этой характеристики и рабочие диапазоны машины:

➤ При $s = 0$, $M = 0$. Данный результат был установлен ранее на основе физических рассуждений о принципе действия асинхронной машины.

➤ При $s > 0$, $M > 0$. Это режим двигателя, причем при $s > 1$ двигатель работает в режиме электромагнитного тормоза или противовключения (это такой режим, при котором магнитное поле вращается в обратном направлении по отношению к ротору). Когда ведутся расчеты режима противовключения, скорость вращения поля статора принимается $-n_1$, тогда скольжение будет равно:

$$s = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} \geq 1.$$

➤ При $s < 0$, $M < 0$. Это режим генератора. В таком режиме вал машины вращается от внешнего устройства в том же направлении, что и магнитное поле статора, но быстрее его. То есть в расчетах генераторного режима следует принимать $n > n_1$, и скольжение будет отрицательным:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \leq 0.$$

➤ При $s = \infty$, $M = 0$. При таком скольжении $f_2 = sf_1 = \infty$ ток I_2 становится чисто реактивным, и вращающий момент в машине не создается.

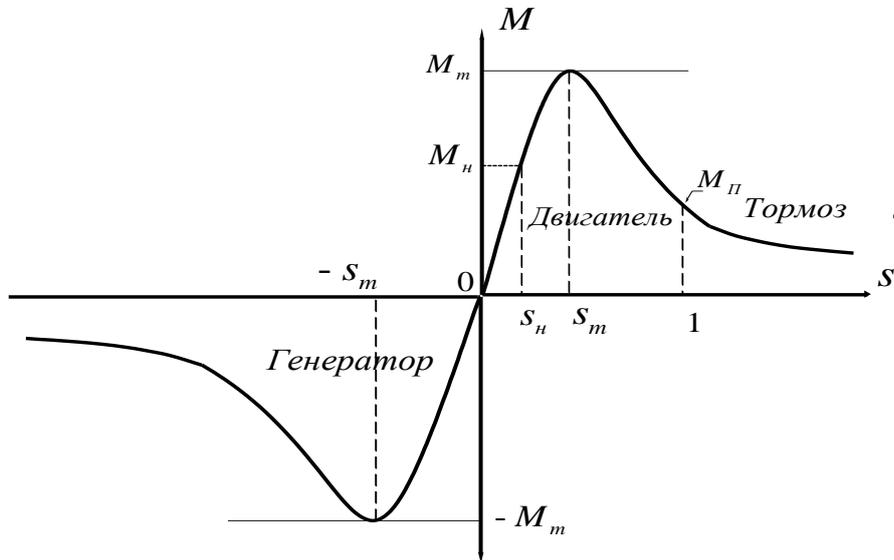


Рис. 7.1. Механическая характеристика асинхронной машины при $U_1 = \text{const}$

Из рисунка 7.1 также следует, что электромагнитный момент машины достигает положительного и отрицательного максимумов при значениях скольжения, называемых критическими $\pm s_m$.

Ниже, без доказательств приведем формулы для расчета основных значений механической характеристики асинхронной машины.

1. Критическое скольжение и максимальный момент:

$$s_m = \frac{c r_2'}{\sqrt{r_1'^2 + (x_1 + c x_2')^2}}; \quad (7.5)$$

$$M_m = \frac{p m U_1^2}{2 \omega_1 c \left[r_1 + \sqrt{r_1'^2 + (x_1 + c x_2')^2} \right]}. \quad (7.6)$$

Для нормальных асинхронных машин можно принять $r_1 \approx 0$, а часто и $c_1 = 1$, что дает удобные для практических расчетов формулы:

$$s_m \approx \pm \frac{c_1 r_2'}{x_1 + c_1 x_2'} \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2};$$

$$M_m \approx \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 c_1 (x_1 + c_1 x_2')} \approx \pm \frac{p m_1 U_1^2}{2 \omega_1 (x_1 + x_2')}.$$

2. Формула М. Клосса:

$$\frac{M}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}. \quad (7.7)$$

Это приближенная, но удобная формула, которая позволяет по критическим параметрам определить текущие параметры машины. При $s_m \approx 0,15-0,03$ ошибка в расчете моментов составляет не более 10–15%.

3. Пусковой момент двигателя M_{Π} , действует в момент пуска двигателя, когда $n = 0$, ($s = 1$):

$$M_{\Pi} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left[(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]} \quad (7.8)$$

Величина этого момента является одним из важнейших эксплуатационных параметров двигателя.

Анализ эксплуатационных свойств механической характеристики асинхронных двигателей. На рисунке 7.2 приведен фрагмент механической характеристики асинхронной машины, соответствующий только режиму двигателя ($0 \leq s \leq 1$). Целью этого анализа является:

- определение зон работы машины;
- влияние параметров машины на механическую характеристику.

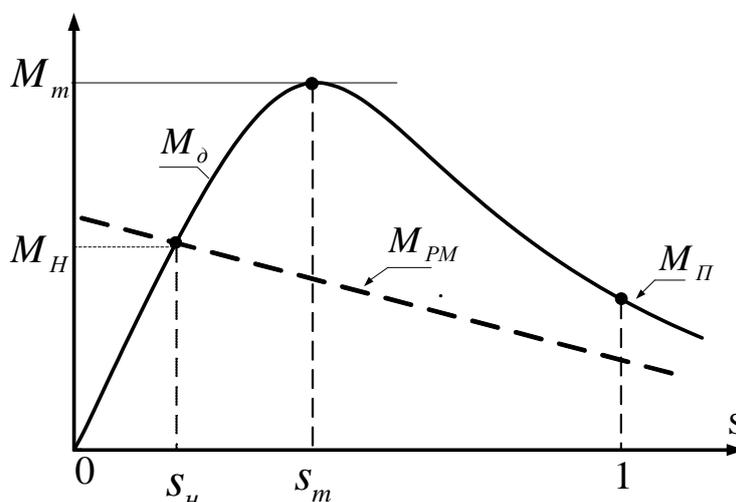


Рис. 7.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя:

$M_{\text{д}}$ – момент, развиваемый двигателем; $M_{\text{н}}$ – номинальный момент двигателя;

$M_{\text{м}}$ – максимальный момент двигателя;

$M_{\text{рм}}$ – момент сопротивления рабочего механизма; $M_{\text{п}}$ – пусковой момент

Для удобства анализа разделим диапазон скольжений $0 \leq s \leq 1$ на отдельные участки и выделим характерные точки:

1) **участок (0– s_m)** – это рабочий участок характеристики, на котором обеспечивается устойчивая работа двигателя с рабочим механизмом, на этом участке двигатель работает с малыми скольжениями ($s \approx 0,002-0,003$), что обеспечивает высокий КПД;

2) s_m – это скольжение, при котором достигается максимальный момент двигателя (в асинхронных двигателях нормального исполнения $s_m \approx 0,1-0,2$);

3) M_m – это значение максимального момента двигателя в асинхронных двигателях нормального исполнения, кратность максимального момента:

$$k_m = M_m / M_{\text{н}} \approx 1,7-3,0;$$

4) $M \equiv U^2$ – это момент, развиваемый двигателем, который пропорционален квадрату фазного напряжения на его зажимах. Высокая чувствительность двигателя к изменению напряжения питания – это серьезный недостаток асинхронных двигателей. Например, при уменьшении напряжения сети до $0,6 U_{\text{н}}$ (это стандартная установка реле минимально-

го напряжения) происходит значительное падение момента до величины $0,36 M_H$, что часто приводит к остановке рабочего механизма;

5) $r_2 \approx \text{var}$ – это изменение активного сопротивления ротора, которое значительно деформирует механическую характеристику двигателя, что проиллюстрировано на рисунке 7.3. Увеличение r_2 приводит к следующим изменениям: к увеличению значения критического скольжения, что приводит также к увеличению и рабочего скольжения (точки пересечения характеристик двигателя M_d и рабочего механизма $M_{р.м.}$), что, в свою очередь, становится причиной увеличения потерь в роторе и уменьшения КПД, но, с другой стороны, к увеличению пускового момента $M_{п3} > M_{п2} > M_{п1}$ до тех пор, пока $s_m \leq 1$, что улучшает пусковые характеристики двигателя.

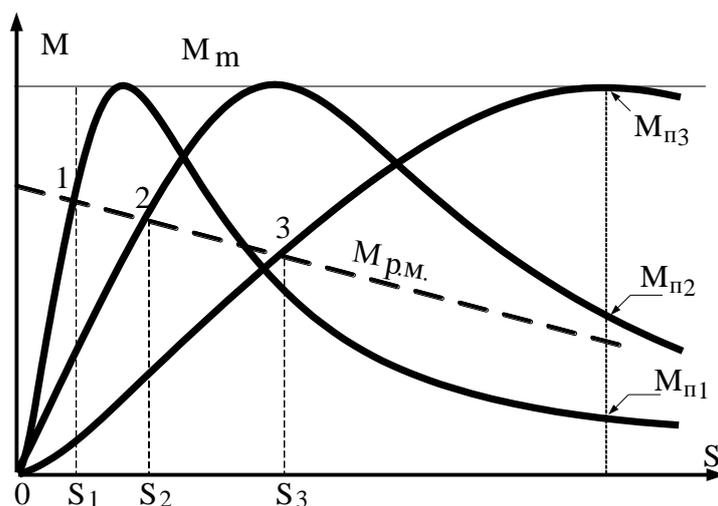


Рис. 7.3. Изменение механической характеристики асинхронного двигателя при изменении активного сопротивления ротора

Таким образом, изменение сопротивления ротора оказывает противоречивое влияние на эксплуатационные свойства двигателя: при улучшении одних характеристик происходит ухудшение других характеристик. Например, улучшение пусковой характеристики приводит к ухудшению рабочих характеристик, и наоборот. В серийных машинах это противоречие разрешается двумя путями.

В двигателях с короткозамкнутым ротором используют эффект вытеснения тока в пазу ротора, а в двигателях с фазным ротором в цепь ротора вводится дополнительное внешнее сопротивление, значение которого может быть выбрано любым.

7.2. Асинхронные двигатели с изменяющимся сопротивлением обмотки ротора

Глубокопазные двигатели. В глубокопазных двигателях применяются стержни обмотки ротора с достаточно большим отношением высоты $h_{ст}$ к ширине $b_{ст}$. Так как линии магнитного поля стремятся идти по пути наименьшего сопротивления, то центр поля рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ опускается к основанию паза, и магнитный поток распределяется так, что нижние части стержня оказываются сцепленными с большим числом линий потока рассеяния, чем верхние (рис. 7.4 (а)). Это приводит к тому, что в нижних слоях стержня наводится большая ЭДС, а в верхних слоях – меньшая.

В результате этого индуктивное сопротивление внизу стержня максимально и уменьшается по мере подъема, а, следовательно, и ток по высоте стержня распределяется неравномерно (кривая при $s = 1$ на рисунке 7.4 (б)). Этот эффект тем сильнее, чем выше частота тока.

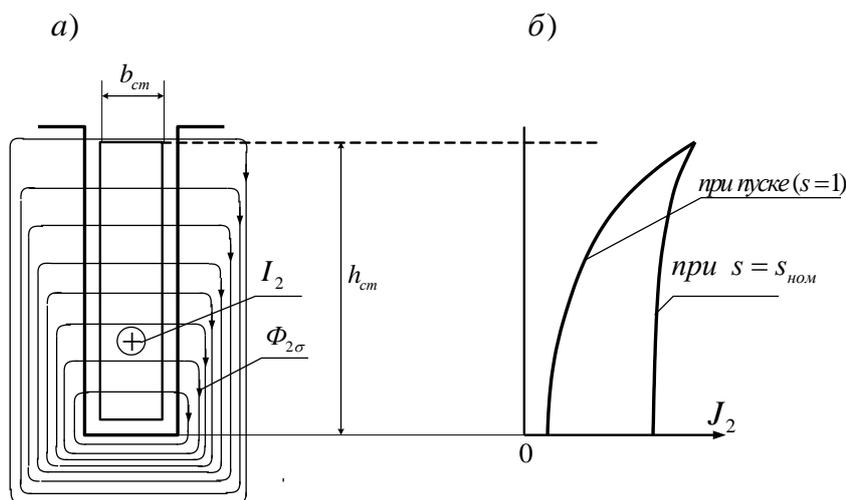


Рис. 7.4. Магнитное поле рассеяния в пазу ротора (а) и распределение плотности тока в стержне ротора (б)

В момент включения двигателя скорость вращения ротора $n = 0$, значит скольжение $s = 1$, частота тока в роторе максимальная: $f_2 = f_1$, а индуктивное сопротивление нижней части стержня значительно больше, чем верхней, и ток в стержне резко вытесняется в верхнюю часть. Так как почти весь ток ротора проходит по верхней части стержня, его эквивалентное поперечное сечение становится намного меньше сечения всего стержня – это равносильно увеличению активного сопротивления стержня ротора, что, как известно, способствует росту пускового момента двигателя.

По мере разгона двигателя скольжение и частота тока в роторе уменьшаются, эффект вытеснения ослабевает, и распределение тока по высоте стержня выравнивается (кривая при s_n на рисунке 7.4 (б)).

При работе двигателя с номинальным скольжением $s_n = 0,02-0,05$ частота тока в роторе незначительна $f_2 = 1-2,5$ Гц и эффект «вытеснения» тока практически отсутствует, ток почти полностью проникает в паз, и сопротивление уменьшается до нормального значения, двигатель работает, как обычный короткозамкнутый.

Таким образом, двигатель с глубокими пазами на роторе обладает благоприятным соотношением пусковых параметров: большим пусковым моментом при сравнительно небольшом пусковом токе, и имеет следующие пусковые характеристики:

$$k_{п.м} = \frac{M_{п}}{M_{н}} = 1,0 \div 1,4; \quad k_{п.т} = \frac{I_{п}}{I_{н}} = 4,5 \div 6,0.$$

На рисунке 7.7 приведена механическая характеристика глубокопазного двигателя и для сравнения показана механическая характеристика двигателя нормального исполнения.

В глубокопазных двигателях используется достаточно широкий набор профилей пазов ротора, например, широко применяются роторы с колбовидными и трапециевидными пазами (рис. 7.5).

Утолщение нижней части стержней глубокопазного двигателя предусмотрено для более резкого изменения сопротивления обмотки ротора при вытеснении тока. По своим свойствам такие двигатели близки к двухклеточному асинхронному двигателю. При этом обмотка ротора асинхронных двигателей до 100–150 кВт выполняется путем заливки ротора алюминием.

В ряде случаев для усиления эффекта вытеснения тока при пуске и улучшения пусковых свойств асинхронного двигателя пазам ротора придается удлинение в радиальном направлении формы (рис. 7.5 (в, г, д)).

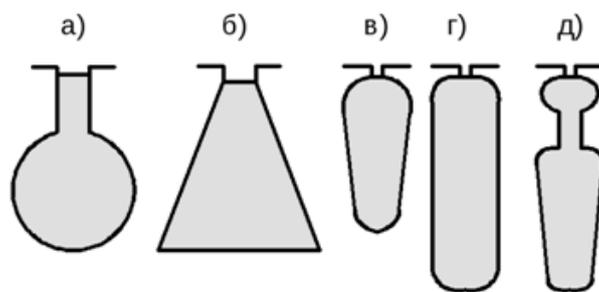


Рис. 7.5. Профили пазов глубокопазного ротора

Хотя пусковые характеристики глубокопазного двигателя значительно лучше, чем у двигателя нормального исполнения, но все-таки они уступают пусковым характеристикам двухклеточного двигателя, который используется при особенно тяжелых условиях пуска.

Двухклеточный асинхронный двигатель. В таком двигателе на роторе располагаются две обмотки (две белых клетки). Стержни одной обмотки располагают в верхней части пазов, ее называют пусковой, а стержни другой обмотки располагают глубже – это рабочая обмотка (рис. 7.6).

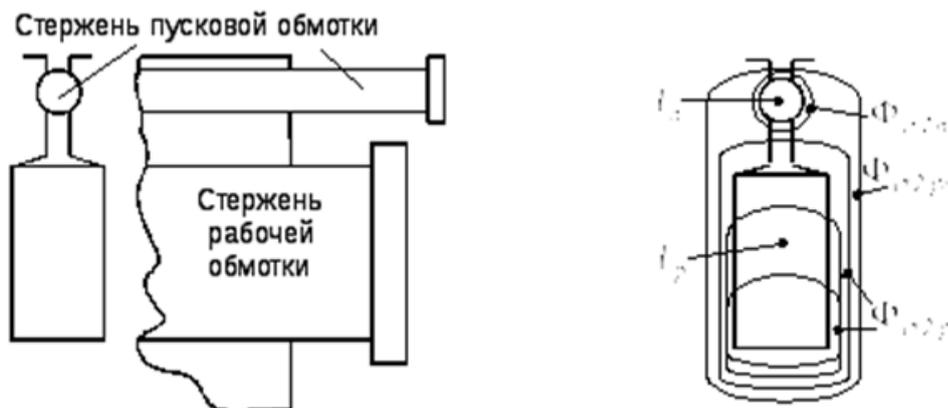


Рис 7.6. Конструкция двухклеточного ротора

Стержни пусковой обмотки выполняются из латуни, а рабочей – из меди. В связи с этим активное сопротивление пусковой клетки в 2–4 раза больше активного сопротивления рабочей клетки. С другой стороны, индуктивное сопротивление наружной клетки в 20–50 раз меньше индуктивного сопротивления внутренней клетки. Это объясняется тем, что стержни рабочей клетки утоплены глубоко в пакет стали ротора и имеют поток рассеяния, значительно превосходящий поток рассеяния пусковой клетки. С достаточным приближением можно считать, что при пуске токи в обмотках распределяются обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям. Следовательно, ток пусковой обмотки много больше тока рабочей обмотки, поэтому при пуске основной момент создает пусковая обмотка.

По мере разгона двигателя скольжение уменьшается, и при номинальном скольжении частота тока в роторе составляет всего $f_2 = 1-2,5$ Гц, при такой частоте индуктивные сопротивления сильно уменьшаются, и токи в обмотках определяются в основном их активными сопротивлениями. Так как $R_{II} > R_P$, то в рабочем режиме ток протекает в основном по внутренней обмотке.

Двухклеточные двигатели обеспечивают еще более благоприятные пусковые условия:

$$k_{п.м} = \frac{M_{п}}{M_{н}} = 1,2 \div 2,0; \quad k_{п.л} = \frac{I_{п}}{I_{н}} = 4,0 \div 6,0.$$

На рисунке 7.7 приведены механические характеристики трех рассмотренных типов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, которые хорошо иллюстрируют действие эффекта вытеснения тока.

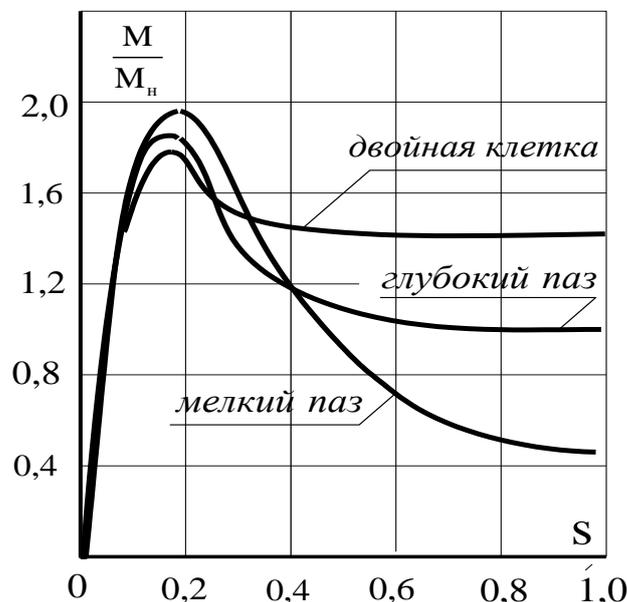


Рис.7.7. Иллюстрация эффекта вытеснения тока на механическую характеристику асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель с фазным ротором. Когда при пуске статический момент сопротивления на валу особенно велик, пуск сопровождается недопустимо большим пусковым током, и в короткозамкнутом роторе двигателя выделяется большое количество тепла. В этом случае используют асинхронный двигатель с фазным ротором. Такие двигатели используются относительно редко и в основном только в тех случаях, когда двигатели с короткозамкнутым ротором неприемлемы по условиям пуска. Двигатель с фазным ротором отличается от двигателей с короткозамкнутым ротором только конструкцией ротора.

В фазном роторе укладывается такая же трехфазная обмотка, как и на статоре, с геометрическими осями фазных катушек, сдвинутыми в пространстве друг относительно друга на 120° . Фазы обмотки ротора соединяются в «звезду», и концы их присоединяются к трем контактными кольцам, насаженным на вал. Кольца электрически изолированы как от вала, так и друг от друга. Такая конструкция обмотки ротора обеспечивает выделение большей части тепловых потерь не внутри машины, а на внешних сопротивлениях.

При этом величину сопротивлений всегда можно подобрать так, что пуск будет произведен при токе, лишь незначительно превышающем номинальный. На рисунке 7.8 (а) показана схема двигателя с трехступенчатым пусковым сопротивлением ротора, а на рисунке 7.8 (б) показан процесс мягкого пуска двигателя. При последовательном замыкании контакторов $K1, K2, K3$ двигатель последовательно переходит на новые механические характеристики 3, 2, 1, чем обеспечиваются благоприятные условия пуска. Моменты коммутации выключателей определяются посредством измерения частоты тока ротора I_2 .

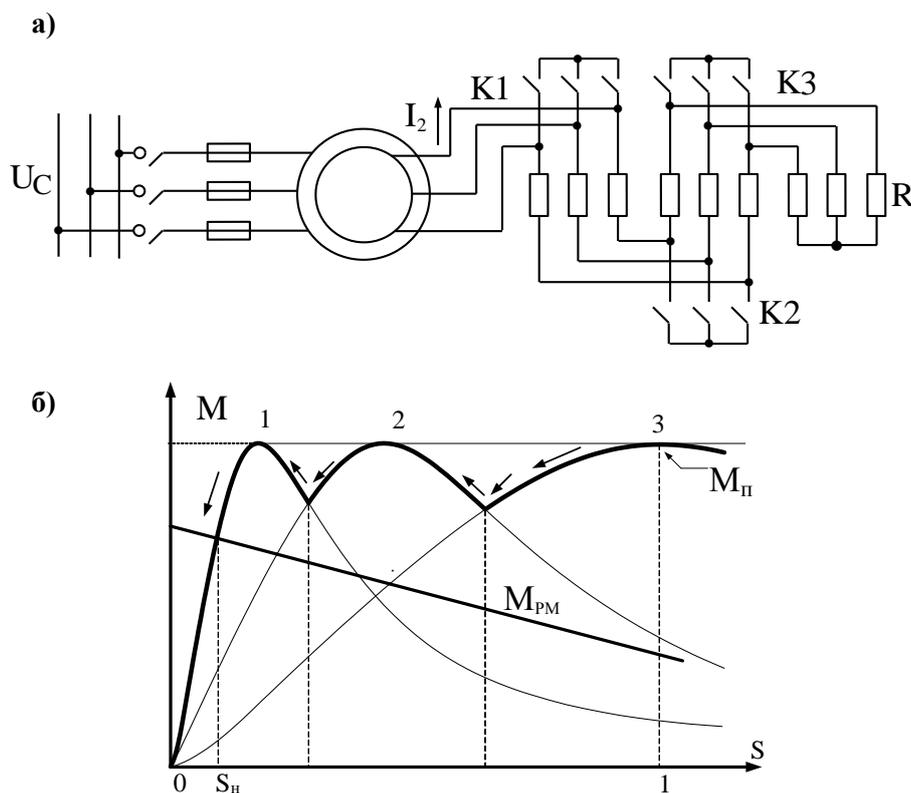


Рис. 7.8. Электрическая схема двигателя с фазным ротором (а) и механическая характеристика, иллюстрирующая его пуск (б):
 M_{PM} – момент рабочего механизма

Отключение асинхронных двигателей с фазным ротором от питающей сети всегда выполняют при цепи ротора, замкнутой накоротко, во избежание появления перенапряжений в фазах обмотки статора, которые могут превысить номинальное напряжение этих фаз в 3–4 раза, если цепь ротора в момент отключения двигателя окажется разомкнутой.

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет лучшие пусковые и регулировочные свойства, однако ему присущи большие масса, размеры и стоимость, чем асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором.

7.3. Пуск асинхронных двигателей

Проблема пуска. В первый момент пуска ротор двигателя неподвижен ($n = 0$) и, следовательно, скольжение $s = 1$. Но так как электрические потери в роторе пропорциональны скольжению:

$$P_{эл2} = sP_{эм} \approx sP_1,$$

то в момент пуска практически вся мощность, поступающая из сети, расходуется на нагрев ротора. Таким образом, чем дольше продолжается пуск, тем больше нагревается ротор, что может стать причиной его повреждения.

При пуске возникает еще одна проблема – это бросок пускового тока, который значительно превосходит номинальное значение. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе в его обмотке индуцируется большая ЭДС, т. к. скорость пересечения обмотки ротора вращающимся магнитным полем при этом максимальная. ЭДС вызывает большой ток в роторе, который, создавая свой магнитный поток, размагничивает машину и тем самым увеличивает ток статора.

Для обеспечения благоприятного пуска асинхронного двигателя нужно выполнить следующие условия:

- 1) двигатель должен развивать достаточно большой пусковой момент;

- 2) величина пускового тока должна быть ограничена величиной, обеспечивающей целостность двигателя, нормальный режим работы сети;
 - 3) схема пуска должна быть относительно простой и дешевой.
- Эти условия легко реализуются для двигателей с фазным ротором, и труднее это сделать для двигателей с короткозамкнутым ротором.

Способы пуска двигателей с короткозамкнутым ротором. В настоящее время для таких двигателей практическое применение нашли следующие способы пуска:

- 1) прямое включение в сеть на номинальное напряжение (прямой пуск);
- 2) пуск при пониженном напряжении на зажимах статорной обмотки;
- 3) на время пуска переключение статорной обмотки со «звезды» на «треугольник».

1. Прямой пуск. Это наиболее простой способ пуска, при этом пусковой ток двигателя составляет $4-7 I_{ном}$. Современные асинхронные двигатели рассчитаны на электродинамическое и тепловое действие таких токов, поэтому прямой пуск возможен всегда, если это не вызывает недопустимого падения напряжения в сети (как правило, не более 10–15%).

Исходя из практики, асинхронные двигатели, мощность которых составляет свыше 20% от мощности источника, включать непосредственно в сеть на номинальное напряжение не рекомендуется. В этом случае пуск двигателей производится при пониженном напряжении или переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

2. Пуск при пониженном напряжении. Применим, когда возможен пуск при пониженной нагрузке на валу. Это объясняется тем, что при уменьшении напряжения на фазе обмотки статора резко уменьшается момент, т. к. M пропорционален U^2 .

Понижение напряжения на обмотке статора достигается подключением двигателя через реактор (рис. 7.9 (а)) либо через автотрансформатор (рис. 7.9 (б)).

3. Пуск переключением «звезда → треугольник». Применение этого способа возможно, если выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает при схеме «треугольник».

Например, двигатель с номинальным напряжением 380/220 В работает от сети 220 В. В этом случае обмотка статора при пуске включается в «звезду», а при достижении нормальной скорости переключается на «треугольник». При таком пуске при включении обмотки в «звезду» напряжение фазы уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, что приводит к уменьшению пускового тока в $\sqrt{3}$ раз и уменьшению момента в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза.

Основным недостатком этого способа пуска является необходимость разрыва цепи статора при переключении, что приводит к перенапряжениям.

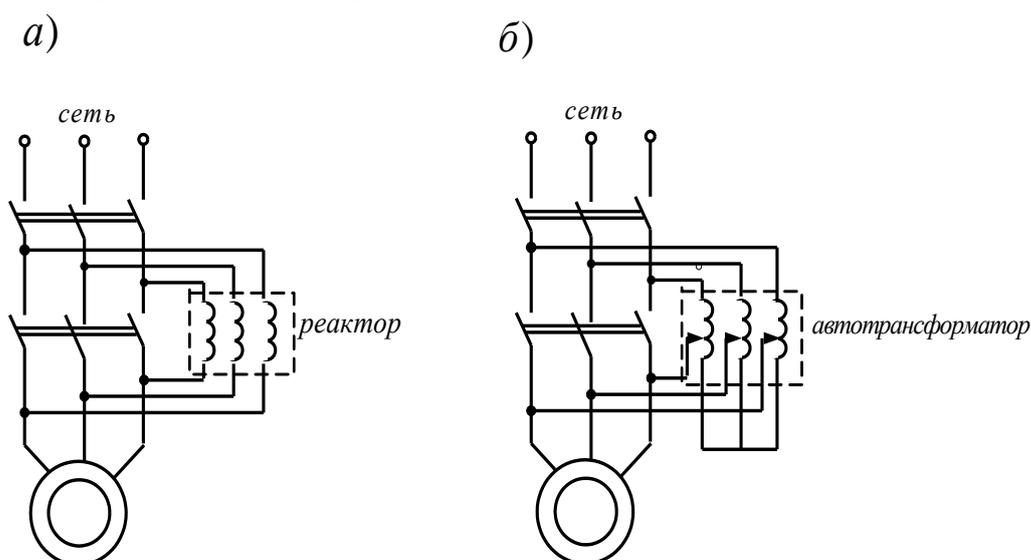


Рис. 7.9. Схемы пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
а) реакторный, б) автотрансформаторный

Для асинхронных двигателей с фазной обмоткой ротора кроме рассмотренных способов также применяют пуск при введенном в цепь ротора реостате (рис. 7.8). Сопротивление реостата уменьшает начальный пусковой ток и увеличивает пусковой момент двигателя.

7.4. Регулирование скорости вращения

Скорость вращения асинхронного двигателя определяется формулой:

$$n = n_1(1-s) = \frac{f_1}{p}(1-s). \quad (7.9)$$

Исходя из этого, определяются и способы регулирования скорости вращения двигателя, а именно изменение частоты, числа пар полюсов, скольжения.

Регулирование скорости изменением частоты питания. При данном способе регулирования двигатель подключается к сети через преобразователь частоты (чаще всего это тиристорный преобразователь частоты). Используя этот способ, следует учитывать важную связь трех параметров: напряжения фазы – U_1 , частоты сети – f_1 и главного магнитного потока – Φ :

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot w_1 k_{об1} f_1 \Phi. \quad (7.10)$$

Определяющим фактором здесь является величина магнитного потока, значительное изменение которого нежелательно: так, при увеличении потока возрастает насыщение магнитной цепи и резко увеличивается намагничивающий ток, а при уменьшении потока возможно возрастание тока ротора и его перегрев. Поэтому в большинстве случаев следует поддерживать $\Phi = \text{const}$.

Отсюда из соотношения (7.10) следует, что одновременно с изменением частоты питания пропорционально следует изменять и напряжение так, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{U_1}{f_1} \approx \text{const}. \quad (7.11)$$

С другой стороны, следует отметить, что закон изменения напряжения зависит от характеристики рабочего механизма, подключенного к валу двигателя.

Если регулирование производится с постоянным моментом нагрузки на валу, то напряжение нужно изменять пропорционально изменению частоты (при снижении скорости). При увеличении скорости этого делать не следует, напряжение должно оставаться в номинальном значении.

Если регулирование скорости производится с постоянной мощностью двигателя (например, в металлорежущих станках), то изменение напряжения U_1 необходимо производить пропорционально квадратному корню изменения частоты f_1 .

При регулировании установок с вентиляторной характеристикой, когда для момента рабочего механизма справедливо соотношение $M_{рм} \equiv n^2$, необходимо изменять подводимое напряжение U_1 пропорционально квадрату изменения частоты f_1 .

Регулирование скорости вращения изменением частоты является наиболее приемлемым вариантом для асинхронных двигателей, т. к. при нем обеспечивается регулирование скорости в широком диапазоне без значительных потерь и снижения перегрузочных способностей двигателя.

Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов. В соответствии с формулой (7.9) скорость двигателя зависит от числа пар полюсов, при этом изменение скорости происходит ступенчато, поскольку число пар полюсов может принимать только определенные значения – 1, 2, 3, 4, 5 и т.д.

Кроме того, этот способ регулирования возможен только в многоскоростных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором, т. к. число полюсов этого ротора всегда равно количеству полюсов статора.

Промышленность выпускает многоскоростные асинхронные двигатели, у которых каждая фаза статорной обмотки состоит из нескольких отдельных частей. Соединение этих частей различным способом дает возможность изменять число пар полюсов, и, следовательно, скорость вращения двигателя.

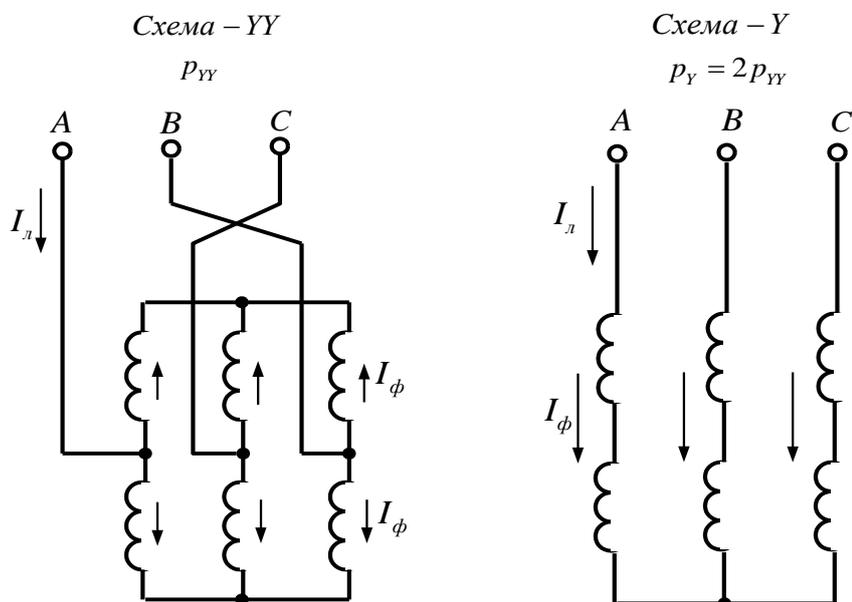


Рис. 7.10. Схема переключения обмоток $YY \rightarrow Y$ с изменением числа полюсов $1 \rightarrow 2$ при постоянном моменте

Изменение количества полюсов достигается переключением катушечных групп статорной обмотки. На рисунках 7.10 и 7.11 приведены наиболее используемые схемы обмоток с переключением числа пар полюсов:

$$p_2 \rightarrow p_1 = 2 \rightarrow 1.$$

Определим основные энергетические свойства этих схем при неизменном линейном напряжении U_1 и примем, что при переключениях КПД и $\cos\phi$ остаются неизменными.

Сравним мощность и момент на валу двигателя для приведенных схем. При переходе от схемы YY к схеме Y (рис. 7.10) мощность на валу уменьшается в два раза:

$$P_{YY} = \sqrt{3} U_1 2I_{\phi} \cos\phi_1, \quad P_Y = \sqrt{3} U_1 I_{\phi} \cos\phi_1,$$

$$\frac{P_{YY}}{P_Y} = 2,$$

и скорость уменьшается тоже в два раза ($p_{YY} = 2p_Y$), отсюда следует, что привод работает с постоянным моментом:

$$M = \frac{P_2}{2\pi n} = \text{const}.$$

При переходе от схемы YY к схеме Δ (рис. 7.11) мощность на валу остается практически постоянной:

$$P_{\Delta} = \sqrt{3} U_1 I_{л1} \cos\phi_1 = \sqrt{3} U_1 \sqrt{3} I_{\phi 1} \cos\phi_1, \quad P_{YY} = \sqrt{3} U_1 2I_{\phi 1} \cos\phi_1,$$

$$\frac{P_{YU}}{P_{\Delta}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,15 ,$$

а так как скорость увеличивается в два раза ($2p_{\Delta} = p_{YU}$), то это приводит и к уменьшению момента в два раза.

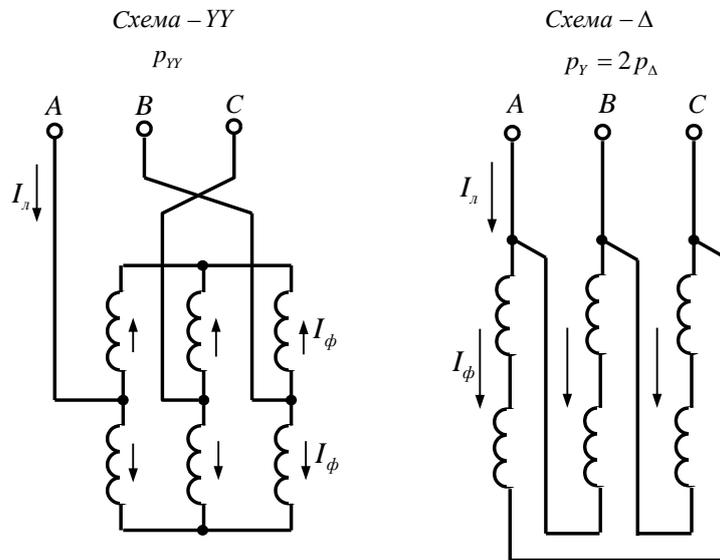


Рис. 7.11. Схема переключения обмоток YU→Δ с изменением числа полюсов 1→2 при постоянной мощности

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя **изменением числа полюсов** относится к наиболее распространенным методам управления электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Такие двигатели называются многоскоростными. Обычно многоскоростные двигатели выпускаются на 2, 3 или 4 скорости вращения.

Регулирование скорости вращения изменением рабочего скольжения можно применять только для двигателей с фазным ротором, для чего в цепь ротора вводят регулировочный реостат. Плавное изменение сопротивления этого реостата приводит к плавному изменению величины скольжения и, следовательно, скорости вращения двигателя. Таким способом можно регулировать скорость вращения только нагруженного двигателя в пределах от 1 до 0,7 номинальной скорости вращения ротора. В режиме холостого хода изменение активного сопротивления цепи ротора почти не влияет на скорость вращения.

Рассмотренный способ регулирования имеет два недостатка: большие потери энергии в реостате и сильное влияние тормозного момента на скорость вращения. Однако этот способ регулирования получил широкое распространение.

7.5. Неноминальные режимы асинхронных двигателей

Из всех возможных режимов асинхронного двигателя, отличающихся от номинального, рассмотрим два наиболее характерных для практики режима – это отклонение от номинального значения напряжения сети и отклонение от номинального значения частоты сети. При анализе используем следующие известные соотношения:

1) если пренебречь падениями напряжения в обмотке статора, то:

$$U_1 = 4,44 \cdot w_1 k_{об1} \cdot f_1 \cdot \Phi , \quad (7.12)$$

отсюда следует, что при изменении U_1 или f_1 происходит изменение главного магнитного потока машины Φ ;

2) если на проводники ротора действует момент, пропорциональный активной составляющей тока ротора I_{2a} и магнитному потоку Φ , то:

$$M \equiv \Phi \cdot I_{2a}, \quad (7.13)$$

отсюда следует, что при постоянном моменте нагрузки на валу $M_{рм} = \text{const}$ изменение Φ приводит к изменению тока ротора I_2 .

Отклонение напряжения при $f_1 = f_{ном}$. Рассмотрим последствия, к которым приводит работа двигателя при отклонении напряжения от номинального значения при условии $M_{рм} = \text{const}$.

1. $U_1 > U_{ном}$. При увеличении напряжения сети увеличивается поток Φ , что приводит к насыщению магнитной цепи и к увеличению намагничивающего тока. Но, с другой стороны, увеличение потока Φ вызывает уменьшение тока ротора I_2 . В результате этого перегружается обмотка статора:

$$\dot{I}_1 \equiv \dot{I}_\mu + \dot{I}_2,$$

а ротор разгружается. В практике эта ситуация не представляет опасности для двигателей, у которых установлена тепловая защита на статоре либо ведется контроль за током статора по приборам.

2. $U_1 < U_{ном}$. При уменьшении напряжения сети магнитный поток Φ уменьшается, что приводит к уменьшению намагничивающего тока, но, с другой стороны, это вызывает увеличение тока ротора I_2 . В результате этого перегружается обмотка ротора, контроль за которой чаще всего не ведется. В практике эта ситуация достаточно опасна, т. к. может привести к перегреву ротора и обрыву ряда его стержней.

Для асинхронных двигателей нормального исполнения устанавливаются допустимые отклонения напряжения от номинального значения в пределах от -5 до $+10\%$.

Отклонение частоты при $U_1 = U_{ном}$. Согласно равенствам (7.12) и (7.13) отклонения частоты приводят к таким же последствиям, как и отклонения напряжения, с той лишь разницей, что увеличение U_1 эквивалентно уменьшению f_1 и наоборот. Поэтому допустимые колебания частоты сети ограничены в пределах $\pm 5\%$.

Переключение обмотки статора слабо загруженного асинхронного двигателя с Δ на Y . Анализ рабочих характеристик асинхронного двигателя позволяет обнаружить возможность улучшения его характеристик при малой нагрузке. На рисунке 7.12 приведены рабочие характеристики асинхронного двигателя при включениях обмотки статора по схемам Δ и Y .

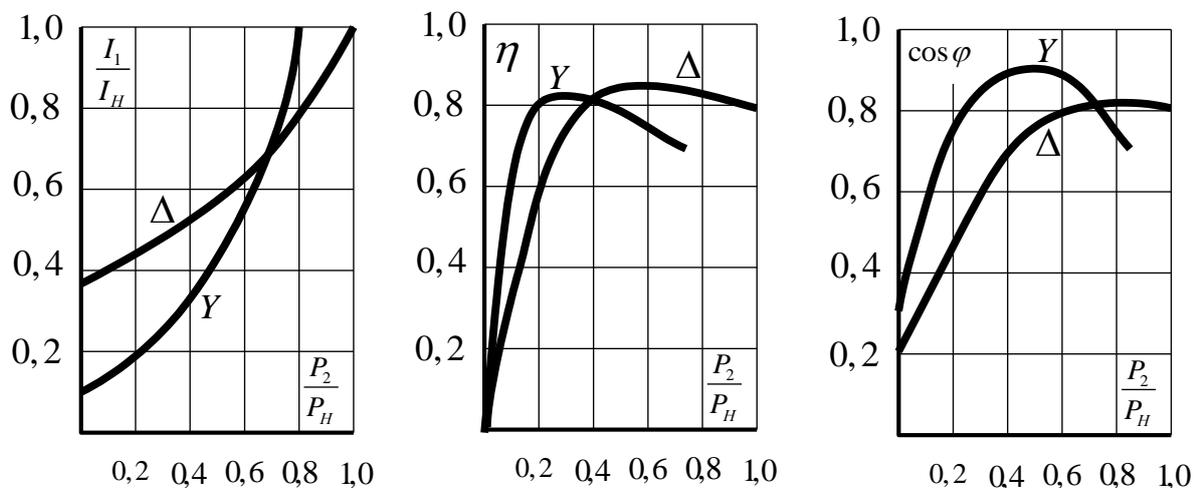


Рис. 7.12. Рабочие характеристики асинхронного двигателя средней мощности при схемах обмотки статора Y и Δ и при $U_{ном}$

Как известно, при переключении обмотки статора с Δ на Y напряжение на фазе уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, что и приводит к изменению характеристик машины. При номинальной нагрузке обмотка включена по схеме Δ , но при нагрузке ниже 45–50% работа машины становится неоптимальной. Из сравнения характеристик видно, что при переключении обмотки статора с Δ на Y режим вновь оптимизируется.

Действительно, при переключении обмотки статора на Y уменьшается напряжение на фазе, что приводит к уменьшению намагничивающего тока I_m , что, в свою очередь, существенно увеличивает коэффициент мощности, также пропорционально U^2 уменьшаются и магнитные потери.

Величина нагрузки, ниже которой такое переключение целесообразно, должна устанавливаться индивидуально по результатам расчета или в процессе эксплуатации по результатам измерений.

7.6. Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей

Несимметричный режим двигателя может наступить по следующим причинам:

- 1) несимметрия напряжения сети;
- 2) несимметрия сопротивлений обмотки статора или ротора;
- 3) несимметричная схема соединения обмоток двигателя.

Для исследования несимметричных режимов работы двигателя воспользуемся методом симметричных составляющих, пренебрегая насыщением и используя метод наложения.

Работа асинхронного двигателя при несимметрии трехфазного напряжения сети. Допустим, что подводимое к двигателю напряжение образует трехфазную несимметричную систему, содержащую прямую (U_{11}), обратную U_{12} и нулевую U_{10} последовательности.

Действие напряжения нулевой последовательности далее не рассматриваем, т. к. это напряжение ток в асинхронном двигателе вызвать не может, потому что при включении обмотки статора в Y нейтраль обычно изолирована, а при схеме Δ ток из сети попасть в двигатель не может.

Напряжение U_{11} создает в машине магнитное поле прямой последовательности, вращающееся в прямом направлении со скоростью n_1 . Скольжение этого поля относительно ротора:

$$s = s_1 = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где n – скорость вращения ротора в направлении вращения поля прямой последовательности.

Напряжение U_{12} создает в машине ток обратной последовательности, и созданное им магнитное поле вращается в обратном направлении со скоростью $n_2 = -n_1$. Скольжение этого поля относительно ротора:

$$s_2 = \frac{n_2 - n}{n_2} = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1}.$$

Подставив сюда скорость ротора, выраженную через скольжение прямой последовательности $n = (1 - s)n_1$, получим:

$$s_2 = 2 - s.$$

Поскольку магнитное поле обратной последовательности вращается в противоположном направлении по отношению к вращению ротора, оно создает отрицательный

(тормозящий) вращающий момент. В результате на ротор действует общий вращающий момент $M = M_1 - M_2$, график которого изображен на рисунке 7.13.

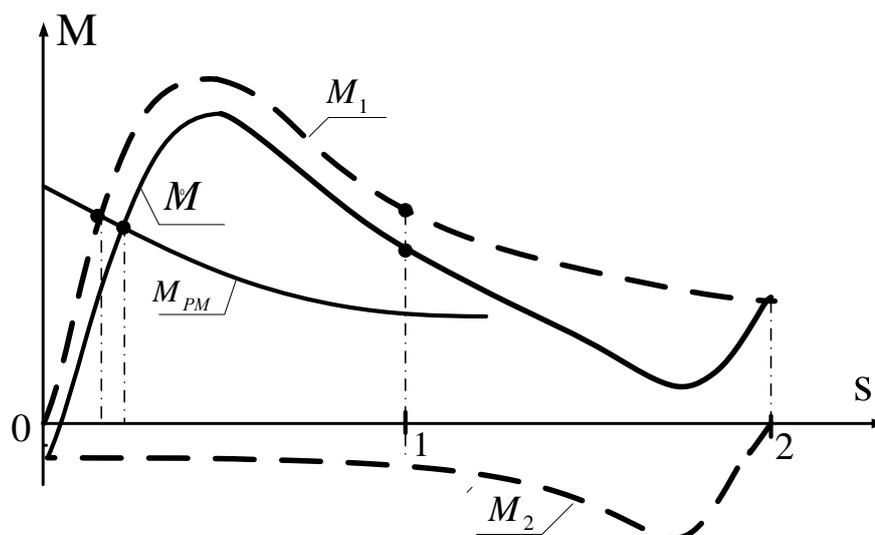


Рис. 7.13. Иллюстрация действия момента обратной последовательности

Как видно, под влиянием поля обратной последовательности результирующий момент снижается, рабочее скольжение увеличивается, что приводит к дополнительному нагреву машины, уменьшению КПД и коэффициента мощности. Кроме того, взаимодействие магнитных полей прямой и обратной последовательности приводит к вибрации с частотой $2f_1$.

Несимметрия сопротивлений обмотки ротора может быть вызвана обрывом одного или нескольких стержней короткозамкнутого ротора, а в фазном роторе – из-за плохого контакта в цепи одной из фаз ротора.

При несимметрии сопротивлений обмотки ротора в нем образуется несимметричная система токов, состоящая из токов прямой I_{21} и обратной I_{22} последовательностей. Эти токи имеют частоту:

$$f_2 = sf_1,$$

и каждый из них создает свое магнитное поле, вращающееся относительно ротора. Прямое и обратное поля вращаются относительно ротора с одинаковой скоростью, но в противоположных направлениях:

$$n_{21} = \frac{f_2}{p} = \frac{sf_1}{p} = sn_1, \quad n_{22} = -\frac{f_2}{p} = -\frac{sf_1}{p} = -sn_1.$$

Прямое поле ротора относительно статора вращается с частотой вращения:

$$n_{пр.р} = n + n_{21} = (1-s)n_1 + sn_1 = n_1,$$

т. е. прямое поле ротора и поле статора вращаются синхронно со скоростью n_1 . Они неподвижны относительно друг друга и создают электромагнитный момент M_1 , аналогичный моменту при симметричном питании. Это нормальный рабочий процесс асинхронного двигателя.

Искажение характеристик машины создает обратное поле ротора. Оно вращается относительно статора с частотой:

$$n_{обр.р} = n - n_{21} = (1-s)n_1 - sn_1 = (1-2s)n_1, \quad (7.14)$$

при этом индуцирует в статоре ток I_{12} с частотой:

$$f_{2c} = (1 - 2s) f_1 ,$$

который замыкается через сеть. В результате взаимодействия обратного поля ротора с током I_{12} на роторе возникает момент M_2 , величина которого зависит от частоты вращения ротора (или от его скольжения).

Действительно, если $s > 0,5$, то согласно (7.14) $n_{обр.р} < 0$, а следовательно, момент $M_2 > 0$, т. е. действует согласно с основным моментом машины. При $s = 0,5$ $M_2 = 0$, а при $s < 0,5$ $n_{обр.р} > 0$ и $M_2 < 0$, т. е. момент становится тормозным.

Таким образом, момент M_2 является знакопеременным, и его направление меняется при скольжении $s = 0,5$ или $n = 0,5n_1$. Графики изменения моментов, действующих на ротор, показаны на рисунке 7.14.

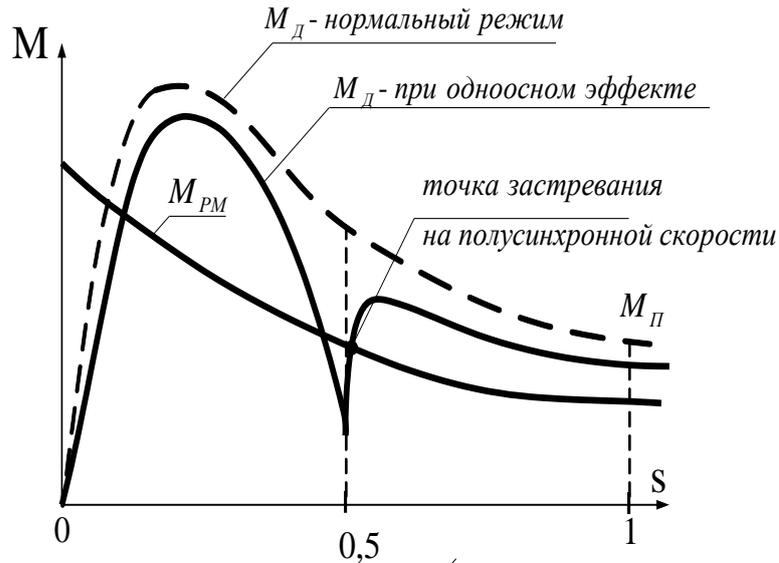


Рис. 7.14. Изменение вращающегося момента при несимметрии цепи ротора

Кривая результирующего момента $M_d = f(s)$ имеет провал при частоте вращения, близкой к полусинхронной. В связи с этим при пуске асинхронного двигателя возможно «застревание» двигателя на полусинхронной частоте вращения. Это явление называют «одноосный эффект Гергеса». Глубина провала определяется уровнем несимметрии сопротивлений обмотки ротора.

7.7. Однофазный режим асинхронных двигателей

Материал этого параграфа разбивается на две темы:

- 1) разработаны и широко используются однофазные асинхронные двигатели, рассчитанные на подключение к однофазной сети;
- 2) в ряде случаев возникает необходимость подключать трехфазный асинхронный двигатель к однофазной сети, либо в процессе работы в трехфазном режиме двигатель иногда оказывается в однофазном режиме.

Однофазный асинхронный двигатель. Такой двигатель на статоре имеет однофазную обмотку, а на роторе обмотку в виде беличьей клетки. Однофазный ток I_1 создает пульсирующее магнитное поле, которое можно представить в виде двух полей с половинной амплитудой, вращающихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью:

$$n_1 = \pm \frac{f_1}{p} .$$

Два вращающихся поля создают на роторе моменты, которые показаны на рисунке 7.15.

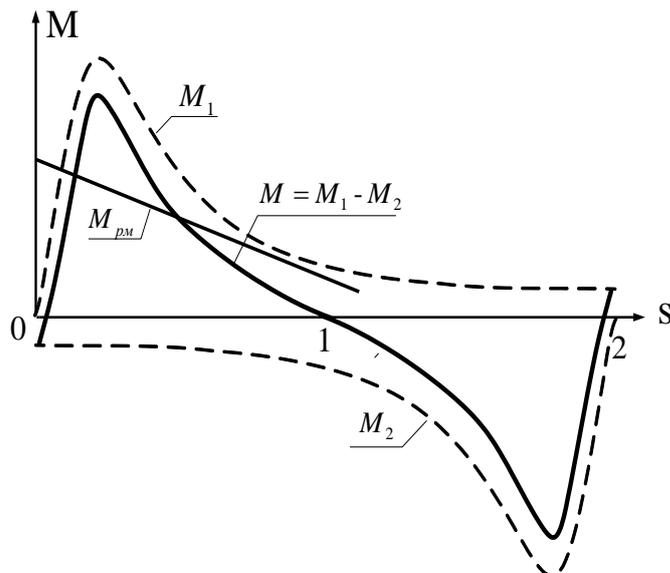


Рис. 7.15. Кривые моментов однофазного асинхронного двигателя

При неподвижном роторе ($n = 0$, $s = 1$) сумма моментов равна нулю, т. е. при пуске такой двигатель пусковой момент не создает. Однако если ротор будет приведен во вращение в ту или другую сторону, то один из моментов станет преобладать, и двигатель продолжит разгон в том же направлении. Для этой цели оба направления вращения равноценны.

Для создания однофазного двигателя, способного развивать пусковой момент, необходимо выполнить условие образования вращающегося магнитного поля, для чего, например, обмотку можно разделить на две части, расположив их под углом друг к другу и одну из них подключив к сети через фазосдвигающий элемент.

Двигатель с пусковой обмоткой. На статоре наматываются две обмотки, расположенные под углом 90° относительно друг друга. Основная обмотка называется главной (рабочей) и обычно занимает $2/3$ пазов сердечника статора, другая обмотка называется вспомогательной (пусковой) и обычно занимает $1/3$ пазов статора. Двигатель фактически является двухфазным, но поскольку рабочей является только одна обмотка, то электродвигатель называют однофазным.

Чтобы обмотки статора создали вращающееся магнитное поле, токи рабочей I_r и пусковой I_{II} обмоток должны быть сдвинуты по фазе во времени, для чего одну из обмоток (обычно пусковую) включают через фазосдвигающий элемент (рис. 7.16). В качестве фазосдвигающего элемента используют активное сопротивление, индуктивность или емкость.

После разгона двигателя до рабочей скорости пусковую обмотку либо отключают, либо меняют параметры фазосдвигающего элемента, чтобы улучшить рабочие характеристики двигателя.

Для получения максимального пускового момента необходимо создать круговое вращающееся магнитное поле, для этого токи в рабочей и пусковой обмотках должны быть сдвинутыми относительно друг друга на 90° и иметь одинаковые амплитуды. Использование в качестве фазосдвигающего элемента резистора или дросселя не позволяет обеспечить требуемый сдвиг фаз, и лишь включение конденсатора определенной емкости позволяет обеспечить такой фазовый сдвиг. Двигатели, в цепь которых постоянно включен конденсатор, используют для работы две фазы и называются конденсаторными.

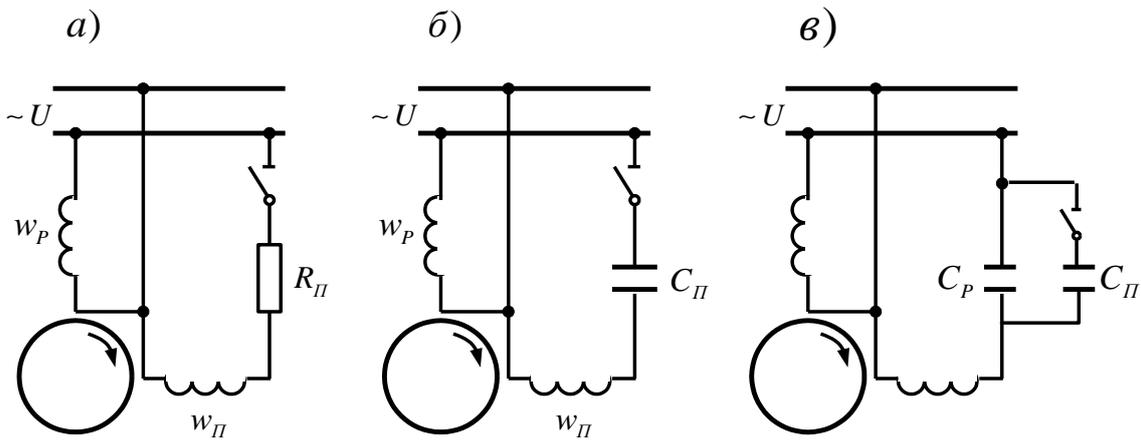


Рис. 7.16. Схемы включения однофазных асинхронных двигателей (а), (б) и конденсаторного двигателя (в)

Трехфазные двигатели в однофазном режиме. Иногда для работы в однофазной сети используются трехфазные двигатели, хотя при этом их характеристики ухудшаются по сравнению с трехфазным режимом. На рисунке 7.17 приведены наиболее эффективные схемы включения таких двигателей. Мощность, развиваемая трехфазным двигателем в однофазном режиме, составляет 40–50% от его номинальной мощности. После окончания пуска обмотка с пусковым сопротивлением отключается.

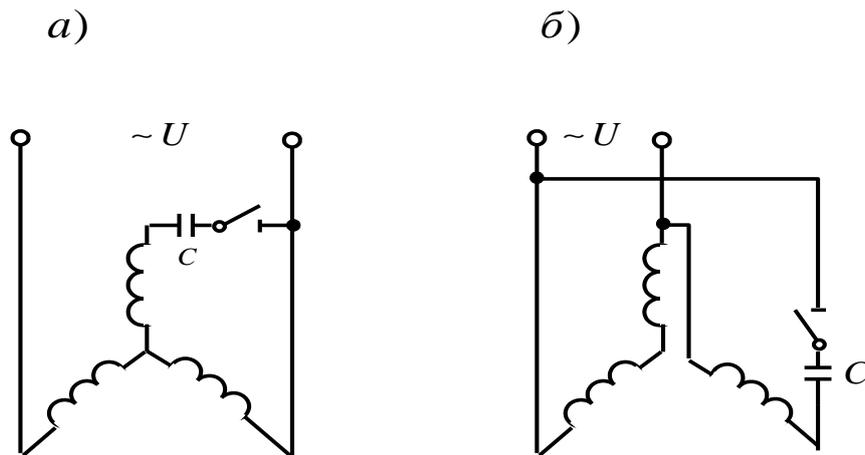


Рис. 7.17. Примеры схем включения трехфазных двигателей в однофазную сеть

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2009. 320 с.: ил.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2010. 352 с.: ил.
3. Беспалов В.Я. Электрические машины: Учеб. пособие. 3-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 320 с.: ил.
4. Гольдберг О.Д. Электромеханика: Учеб. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 512 с.: ил.
5. Галишников Ю.П., Сенигов П.Н., Карпеш М.А. Электрические машины. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭМ.001 РБЭ (904). Челябинск: ООО «Учебная техника», 2005. 210 с.
6. Электрические машины: Учеб. для вузов: В 2 т. Т. 1 / А.В. Иванов-Смоленский. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652[6] с.: ил.
7. Электрические машины: Учеб. для вузов: В 2 т. Т. 2 / А.В. Иванов-Смоленский. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 532[4] с.: ил.
8. Кацман М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу: Учеб. пособие. 7-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 256 с.: ил.

Учебное издание

Щукин Олег Степанович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Курс лекций

Редактор: *Е.В. Ломакина*

Верстка: *Е.В. Ломакина*

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 16.05.2019

Формат 60×84/8. Бумага для множительных аппаратов

Гарнитура Times. Усл. печ. листов 13,75

Заказ 2073

Отпечатано в Нижневарттовском государственном университете

628615, Тюменская область, г.Нижневарттовск, ул.Дзержинского, 11

Отдел издательской политики и сопровождения публикационной деятельности

Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izd@nvsu.ru