

*О.В. Арсентьев, Ю.В. Коновалов*

***РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ***

*2012*

## Введение

Электромеханические системы составляют основу электроэнергетики. Различные типы электромеханических объектов вырабатывают электрическую энергию, при передаче от места генерирования до потребителя изменяют ее параметры, преобразуют в другие виды энергии.

В основном, при производстве и использовании электрической энергии необходимо преобразовывать механическую энергию в электрическую, электрическую в механическую, а также электрическую энергию одного вида тока в энергию другого рода тока. Такое преобразование осуществляется при помощи электромеханических преобразователей (электрических машин).

Изучение теории и конструкции электромеханических систем невозможно без знания истории их развития. В ней можно выделить ряд характерных этапов: появление первых электрических машин; начальный этап их промышленного использования; изобретение первых трехфазных электрических машин; развитие теории электрических машин, методов их расчета и проектирования, появление в связи с этим новых типов электрических машин; этап разработки более совершенной технологии, создания новых изоляционных и магнитных материалов и повышения на этой базе мощности, надежности и экономичности машин; возникновение новых отраслей в электромашиностроении в связи с широким развитием электроавтоматики, авиации, космической техники и других специальных областей.

Электрические машины — это электромеханические преобразователи, в которых осуществляется преобразование электрической энергии в механическую или механической в электрическую. Основное отличие электрических машин от других преобразователей в том, что они обратимы, т. е. одна и та же машина может работать в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию в механическую, и в режиме генератора, преобразуя механическую энергию в электрическую.

По виду создаваемого в машинах поля, в котором происходит преобразование энергии, электрические машины подразделяются на индуктивные, емкостные и индуктивно-емкостные. Современные широко применяемые в промышленности и других отраслях народного хозяйства электрические машины — индуктивные. Преобразование энергии в них осуществляется в магнитном поле. Емкостные электрические машины, хотя и были изобретены задолго до индуктивных, до сих пор не нашли практического применения из-за сложности создания достаточно мощного электрического поля,

в котором происходит преобразование энергии. Индуктивно-емкостные машины появились лишь в последние годы. Преобразование энергии в них происходит в электромагнитном поле, и они объединяют свойства индуктивных и емкостных электрических машин.

Если классифицировать электрические машины с этапа получения электрической энергии, то первыми будут *синхронные машины*. Их применяют в качестве генераторов переменного тока на электрических станциях. Как автономные источники питания повышенной частоты синхронные генераторы используют на кораблях, самолетах, в лесной промышленности и т. п. Синхронные машины применяют также в качестве синхронных компенсаторов. Синхронные машины малой мощности нашли широкое применение в системах автоматики — реактивные двигатели, с постоянными магнитами, гистерезисные, шаговые, индукторные, сельсины и др.

Для передачи на большие расстояния энергии, выработанной на электрических станциях, а также для других целей применяют *трансформаторы*. Их используют для преобразования напряжения в системах передачи и распределения электрической энергии, выпрямительных установках, устройствах связи, автоматики и вычислительной техники, а также при электрических измерениях (измерительные трансформаторы) и функциональных преобразованиях (вращающиеся трансформаторы).

*Асинхронные машины* широко применяют в качестве электродвигателей в различных отраслях техники благодаря простоте их устройства, относительно низкой стоимости и высокой надежности. В системах автоматического регулирования используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы и др.

*Коллекторные машины переменного тока* используют сравнительно редко, поскольку они имеют сложную конструкцию и требуют тщательного ухода. Значительно шире применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе. Их используют в различного рода бытовых приборах и в устройствах автоматики.

*Машины постоянного тока* применяют в качестве генераторов и двигателей в устройствах, требующих регулирования частоты вращения в широких пределах: транспорт (железнодорожный и морской), прокатные станы, электротрансмиссии большегрузных автомобилей, грузоподъемные и землеройные машины, сложные металлообрабатывающие станки и пр.

Двигатели постоянного тока применяют также в устройствах, в которых источниками для питания двигателей служат аккумуляторные батареи (стартерные двигатели, двигатели подводных лодок, космических кораблей и т.п.)

В зависимости от рода потребляемого или отдаваемого в сеть тока электрические машины подразделяются на машины переменного и постоянного тока. Машины переменного тока делятся на синхронные, асинхронные и коллекторные. Несколько отдельно стоят другие статические системы преобразования электроэнергии - трансформаторы. При этом вращающиеся и статические электромеханические системы объединяет общая сущность физических явлений, которые лежат в основе их конструкции и принципа действия.

Правильное использование электромеханических систем определяется знанием их характеристик, зависящих как от параметров системы, так и от условий работы. При этом следует различать следующие основные типы параметров, характеристик:

- паспортные, каталожные данные электрической машины, трансформатора. Они, как правило, приводятся в справочной литературе. Служат для предварительного подбора нужного типа электромеханической системы к условиям производства;
- расчетные характеристики электромеханической системы. По известным расчетным, графо-аналитическим методикам определяются основные зависимости энергетических показателей системы от режимов ее работы. Позволяют более точно подобрать машину с учетом режимов ее работы, величиной и характером нагрузки.

Таким образом, для рационального использования электромеханических систем необходимо знать их паспортные данные и уметь рассчитывать требуемые характеристики.

## 1. Машины постоянного тока

### 1.1. Общие сведения

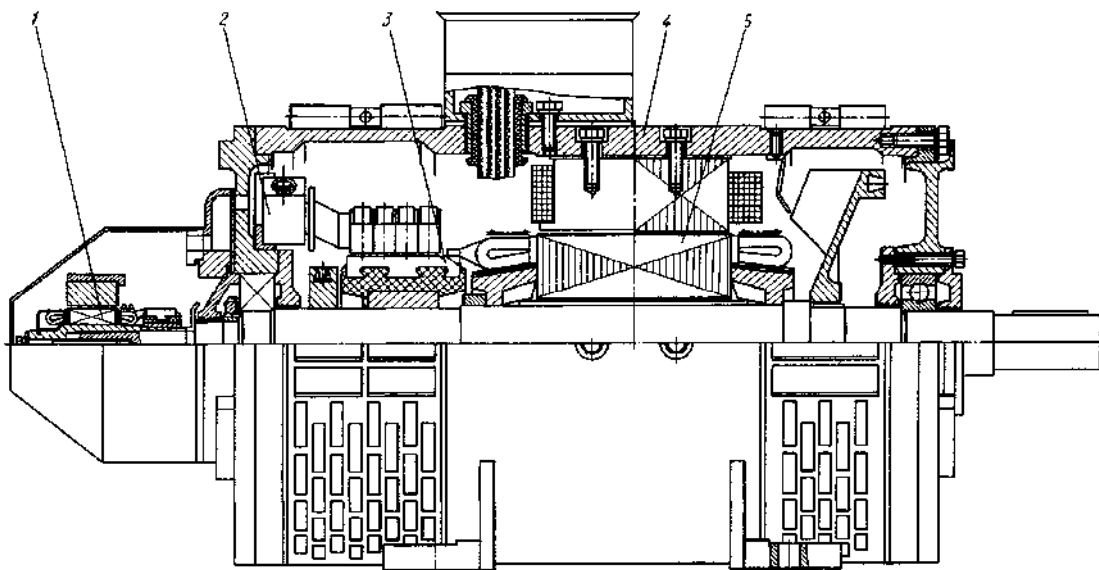
*Коллекторные машины* — это в основном машины постоянного тока. Они выпускаются мощностью от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Коллекторные машины переменного тока находят применение в качестве приводных двигателей лишь для узкого круга специальных механизмов небольшой мощности, например как приводы некоторых бытовых приборов, электрифицированного ручного инструмента, медицинского оборудования, т. е. в тех случаях, когда для питания двигателей используется однофазный и реже трехфазный переменный ток, а характеристики асинхронных машин не удовлетворяют требованиям приводного механизма.

Коллекторные машины постоянного тока используются как двигатели и как генераторы. В промышленности более распространены двигатели, что объясняется все возрастающим применением различных статических выпрямителей, обеспечивающих промышленные установки энергией постоянного тока.

Широкое распространение двигателей постоянного тока несмотря на их более высокую стоимость и сложность эксплуатации по сравнению с асинхронными объясняется в первую очередь простыми и надежными способами регулирования частоты вращения, большими пусковыми моментами и перегрузочной способностью, чем у двигателей переменного тока. Наибольшее распространение двигатели постоянного тока получили в приводах, требующих глубокого регулирования частоты вращения (металлургическая промышленность, транспорт и т. п.).

Основными конструктивными элементами машин постоянного тока (рис. 1.1) являются станина с закрепленными на ней главными и добавочными полюсами, вращающийся якорь с обмоткой и коллектором и щеточный аппарат. В машинах малой и средней мощностей станина одновременно служит и корпусом, к которому крепятся лапы для установки машины, и частью магнитопровода. В ряде машин станину выполняют шихтованной.

К внутренней поверхности станины крепят главные и добавочные полюсы. Сердечники главных полюсов массивные либо набраны из листов стали толщиной 1 - 2 мм. Сердечники добавочных полюсов, как правило, массивные. На главных полюсах располагаются обмотки возбуждения их МДС создают рабочий поток машины.



**Рис. 1.1. Двигатель постоянного тока серии 2П:**  
 1 — тахогенератор; 2 — траверса; 3 — коллектор; 4 — станина;  
 5 — якорь; 6 — главный полюс; 7 — добавочный полюс

Характеристики машин постоянного тока определяются системой возбуждения: независимой, параллельной, последовательной или смешанной. При этом обмотка возбуждения служит для создания основного магнитного потока машины. Для получения требуемых характеристик машины постоянного тока необходимо знать свойства магнитной системы машины, которые, в свою очередь, зависят от применяемых материалов и геометрии магнитопровода. Эти свойства описываются магнитной характеристикой машины  $\Phi_\delta = f(F_\delta)$ , получаемую либо расчетным путем (на стадии проектирования машины), либо экспериментально (для существующих электромашин).

## **1.2. Расчет магнитной цепи машины постоянного тока**

В предлагаемой работе по заданным исходным данным необходимо рассчитать магнитную цепь машины постоянного тока (МПТ) и построить его магнитную характеристику. При этом должны быть выполнены и представлены следующие элементы:

- расчет магнитной цепи для номинального режима;
- таблица с результатами расчета для 0,5; 0,75; 0,9; 1; 1,1; 1,25 -  $\Phi_{\delta H}$  (от номинального значения магнитного потока в воздушном зазоре);
- магнитная характеристика МПТ;

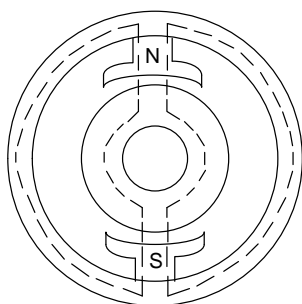
- расчет коэффициента насыщения магнитной цепи определенный аналитически и графически;
- эскиз магнитной цепи, вариант исполнения определяет задание преподавателя.

Намагничивающая сила обмотки возбуждения машины постоянного тока создает магнитный поток, который замыкается через участки машины, образующие магнитную цепь. Участками магнитной цепи являются: станина (ярмо), сердечники полюсов (включая полюсные наконечники), сердечник якоря и его зубцовый слой, воздушный зазор между полюсными наконечниками и якорем.

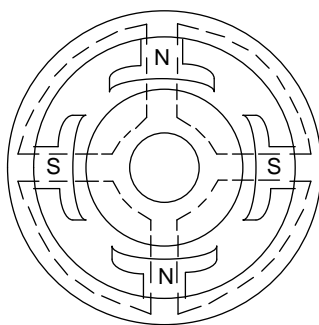
Основным магнитным потоком  $\Phi_\delta$  называется поток в воздушном зазоре  $\delta$ , приходящийся на один главный полюс машины. Величина  $\Phi_\delta$  определяет значение индуцируемой в обмотке якоря ЭДС.

При проектировании машины постоянного тока возникает необходимость определения зависимости  $\Phi_\delta$  от тока возбуждения полюсов. Эта задача решается путем расчета магнитной цепи машины при холостом ходе, когда ток якоря  $I_a = 0$ . Вследствие симметрии устройства машины и равенства потоков всех полюсов достаточно рассмотреть магнитную цепь одной пары полюсов.

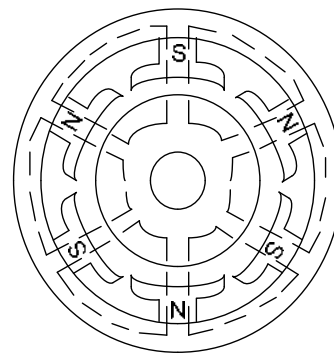
а)



б)



в)



**Рис. 1.2. Магнитные системы МПТ:**  
а) 2-х полюсная; б) 4-х полюсная; в) 6-и полюсная

На рис.1.2. изображены магнитные системы машин постоянного тока с разным числом главных полюсов. Во всех случаях магнитная система представляет собой разветвленную симметричную цепь. Магнитный поток каждого полюса разделяется на две равные части и направляется к двум соседним полюсам. Каждая часть потока проходит последовательно по участкам магнитной цепи машины, составляющей её расчетную часть.

На рис.1.3. показана расчетная часть магнитной цепи четырехполюсной машины, на которой видны все её участки: воздушный зазор ( $\delta$ ), зубцы якоря ( $h_z$ ), спинка якоря ( $L_a$ ), полюсы ( $h_m$ ), ярмо ( $L_{я}$ ).

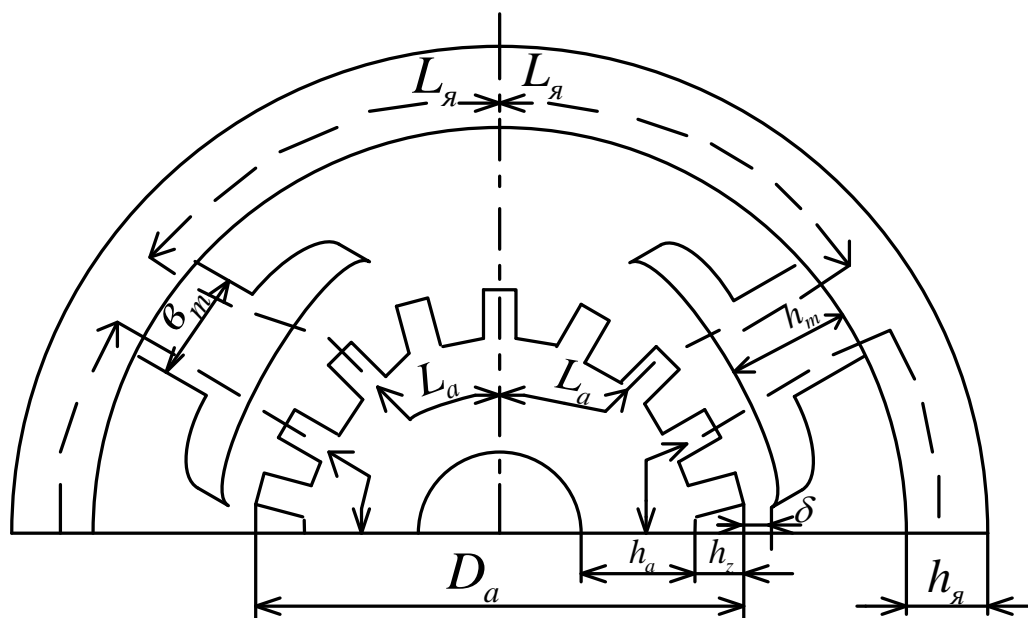


Рис.1.3. Расчетная часть магнитной цепи машины постоянного тока

Для каждого полюса штриховой линией показана такая магнитная линия потока  $\Phi_\delta$ , длину которой можно считать средней для всех магнитных линий, и тогда магнитную цепь можно рассчитать на основе закона постоянного тока для средней магнитной линии по формуле (1)

$$\oint H dl = \Sigma i, \quad (1)$$

где  $H$  - напряженность магнитного поля;

$dl$  - элемент длины магнитной линии;

$\Sigma i$  - полный ток, охватываемый магнитной линией.

Точные вычисления линейного интеграла (1) на практике затруднительны. Поэтому магнитную цепь разбивают на участки: воздушный зазор ( $\delta$ ), зубцы якоря ( $h_z$ ), спинка якоря ( $L_a$ ), полюсы ( $h_m$ ), ярмо ( $L_{я}$ ) и заменяют интеграл суммой, предполагая, что на протяжении каждого участка  $H$  постоянна.

Тогда вместо равенства (1) получим:

$$2H_\delta \delta + 2H_z h_z + 2H_a L_a + 2H_m h_m + 2H_{я} L_{я} = 2i_b w_b \quad (2)$$



где  $\delta$ ,  $h_z$ ,  $L_a$ ,  $h_m$ ,  $L_y$  – показанные на рис.1.3. геометрические размеры, равные длинам отрезков средней магнитной линии;

$H_\delta$ ,  $H_z$ ,  $H_a$ ,  $H_m$ ,  $H_y$  – напряженности магнитного поля на соответствующих участках;

$w_\delta$  – число витков обмотки возбуждения на полюсе;

$i_\delta$  – ток возбуждения.

Левая часть уравнения (2) представляют собой падения магнитного напряжения участков цепи, а их сумма – полное падение магнитного напряжения машины, равное сумме магнитных напряжений всех участков магнитной цепи на пару полюсов.

Для каждого участка магнитной цепи магнитное напряжение  $F = H \cdot l$ , тогда (2) можно записать в виде:

$$2F_\delta + 2F_z + 2F_a + 2F_m + 2F_y = 2F_\delta = 2i_\delta w_\delta \quad (3)$$

где  $F_\delta$  – сумма магнитных напряжений всех участков цепи на один полюс.

Расчет магнитной цепи производят исходя из заданного значения ЭДС  $E_a$  и пропорциональной ей индукции в зазоре  $B_\delta$ , путем определения значения  $H$  на отдельных участках цепи. Вводится допущение, что поток распределяется равномерно по сечениям этих участков, и затем вычисляют сумму (2) или (3).

При проектировании МПТ сечения участков магнитной цепи выбираются обычно таким образом, чтобы при номинальном режиме значения индукции находились в пределах, указанных в таблице 1.

При изготовлении полюсов из холоднокатаной стали допускается увеличение индукции в полюсе  $B_m = 1,8T$ .

Плотность потока в медной обмотке возбуждения обычно находится в пределах  $2,0 - 3,5 \text{ А/мм}^2$ , а в алюминиевых обмотках примерно на 20% меньше.

Таблица 1

**Значения индукции в машинах постоянного тока**

Участок магнитной цепи	Значение индукции, $T$
Воздушный зазор	0,5 – 1,0
Полюс	1,2 – 1,6
Сердечник якоря	1,0 – 1,5
Ярмо станины: а) стальное литье и стальной прокат б) чугунное литье	1,1 – 1,2 0,5 – 0,7

Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от внешнего диаметра якоря приведены на рис.1.4.

Геометрия магнитной цепи МПТ: высота спинки  $h_a$ , толщина станины (яр-ма)  $h_{я}$ , ширина сердечника главного полюса  $b_m$  должны определять условие насыщения, при котором номинальному значению магнитного потока в воз-душном зазоре  $\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta ном}$ , соответствуют значения магнитной индукции на участках в пределах, указанных в таблице 1.

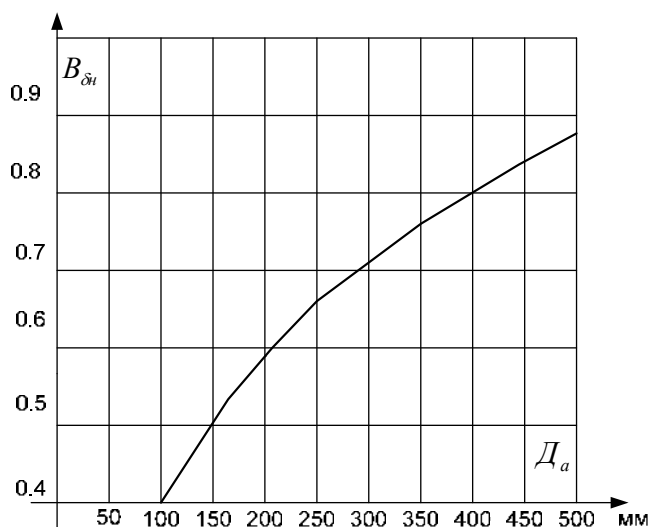


Рис.1.4. Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря.

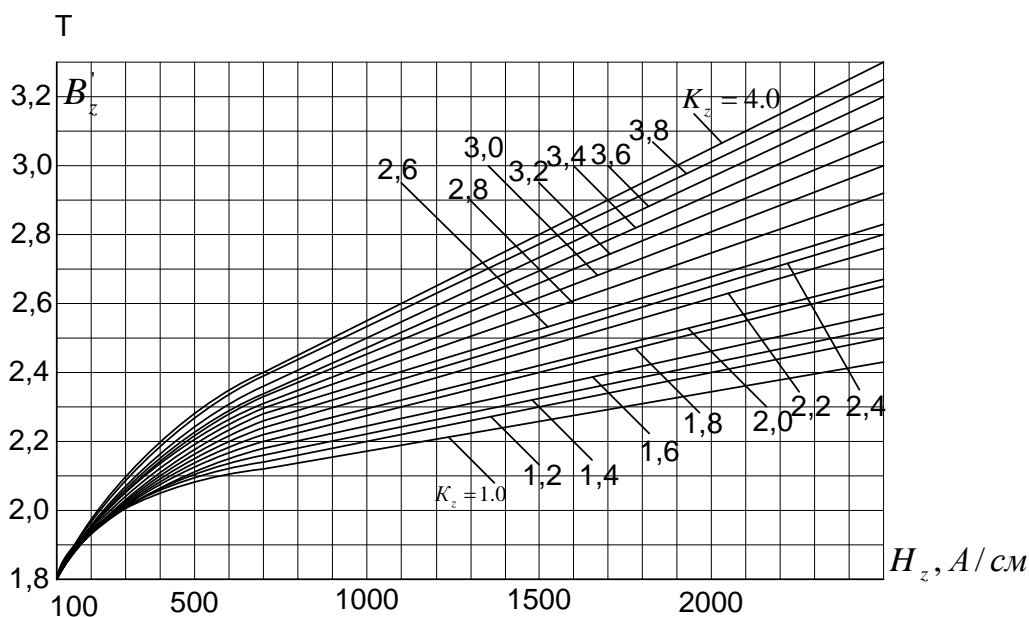


Рис.1.5. Кривые намагничивания сталей для определения  $B_z$  и  $H_z$  в зубцах якоря из литой электротехнической стали марок 1211, 1212, 1311

Расчет магнитной цепи необходимо начать с определения геометрических размеров машины постоянного тока.

Наиболее сложный характер имеет магнитное поле в воздушном зазоре, на который приходится наибольшая часть магнитного напряжения (до 60 – 80%).

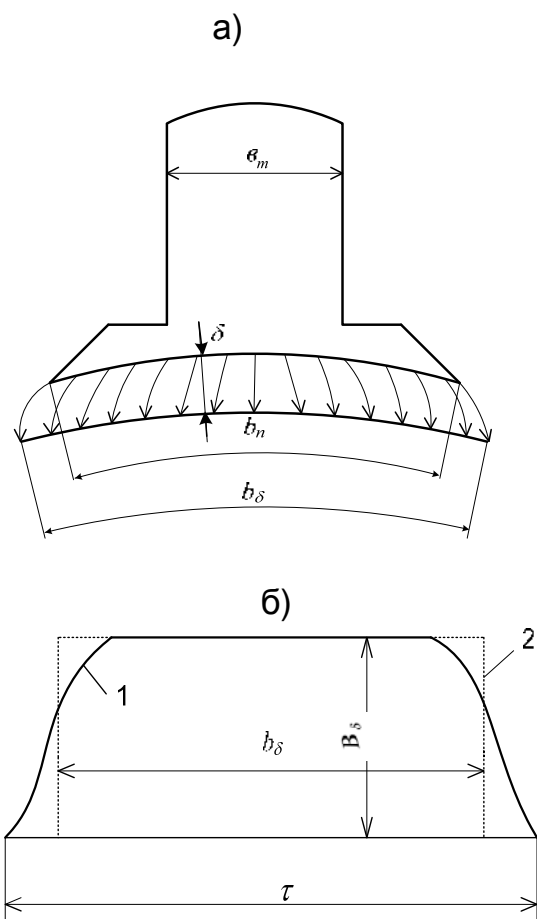


Рис.1.6. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре при гладком якоре

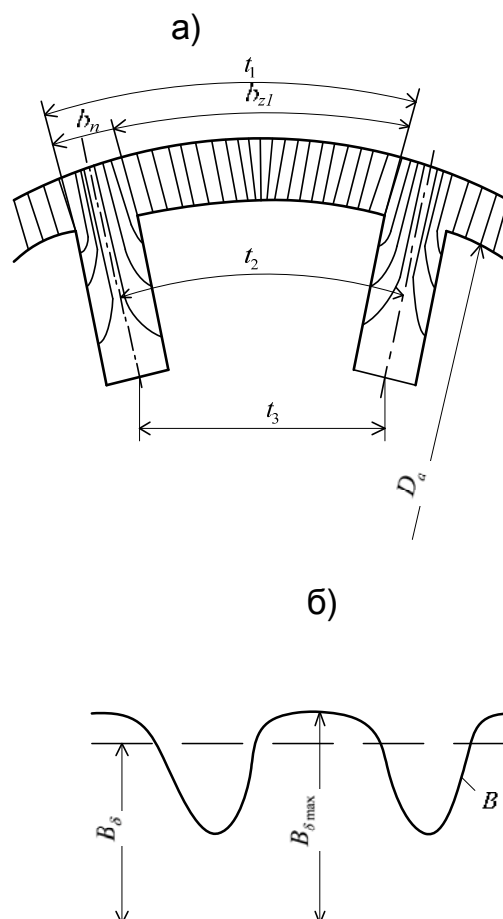


Рис.1.7. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом зубцов якоря

На рис. 1.6а и 1.7а показан характер магнитного поля в зазоре вдоль окружности якоря, соответственно, при отсутствии зубцов и с учетом его зубчатой поверхности. На рис.1.6б приведена кривая 1 распределенная магнитной индукции  $B_\delta$  на поверхности гладкого якоря на протяжении полюсного деления:

$$\tau = \pi D_a / 2p ,$$

где  $D_a$  – внешний диаметр якоря (м),

$2p$  – число полюсов.

Для расчетных целей кривую 1 заменяют прямоугольником 2 (рис.1.6б) шириной  $B_\delta$  и высотой, равной действительному значению индукции  $B_\delta$  в средней части зазора.

Площадь прямоугольника равна площади фигуры, ограниченной кривой 1 и осью абсцисс, что означает равенство потоков, соответствующих кривым 1 и 2.

При наличии на якоре пазов поле над ними ослабляется и кривая  $B_\delta$  вдоль воздушного зазора принимает зубчатый вид (рис.1.7б).

Коэффициент воздушного зазора, обусловленный зубчатостью якоря определяется по следующему выражению

$$K_{\delta 1} = \frac{B_{\delta \max}}{B_\delta}$$

Это значение устанавливается на основе анализа поля в зазоре и пазах методом конформных отображений.

Однако получаемые при этом соотношения весьма сложные на практике пользуются приближенным выражением

$$K_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta}$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(b_n / \delta)^2}{5 + b_n / \delta},$$

где  $b_n$  – ширина открытия паза у поверхности воздушного зазора (в задании рассматриваются пазы якоря открытые, с параллельными стенками, рис. 1.9), (в дальнейшем – ширина паза).

Определяем зубцовые деления в трех сечениях:

$$t_1 = \pi D_a / z \quad - \text{ величина зубцового деления в верхней части зубца;}$$

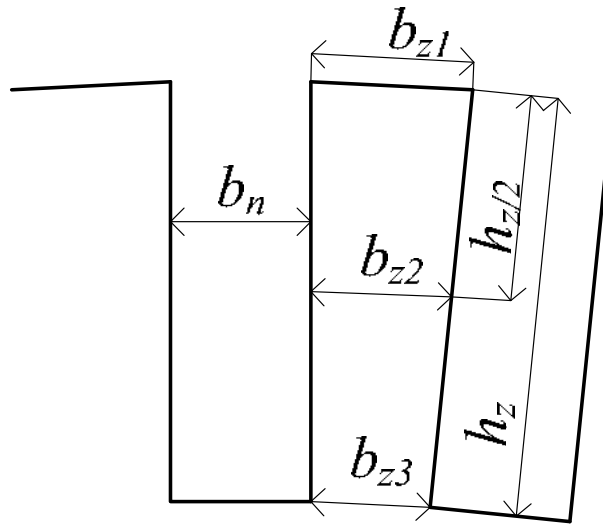


Рис. 1.8. Зубцовая зона якоря с прямоугольными пазами и трапециидальными зубцами

$t_3 = \pi(D_a - 2h_z) / z$  - величина зубцового деления у основания зубца,

где  $z$  – число пазов (зубцов) якоря МПТ;

$h_z$  – высота паза;

$t_2 = \frac{t_1 + t_3}{2}$  - величина зубцового деления посередине зубца.

В соответствии с рис. 1.8 определяем ширину зубца в трех сечениях:

$b_{z3} = \frac{t_1}{t_1 / b_{z3}}$  - ширина зубца у основания,

$b_n = t_3 - b_{z3}$  - ширина паза,

$b_{z1} = t_1 - b_n$  - ширина зубца в верхней части,

$b_{z2} = 1/2(b_{z1} + b_{z3})$  - ширина зубца посередине.

Величина  $b_\delta$  называется расчетной полюсной дугой, она отличается от реальной полюсной дуги  $b_n$  (рис.1.6а) на некоторое значение, зависящее от формы полюсного наконечника. Точное значение  $b_\delta$  может быть установлено путем построения картины поля в зазоре графическим методом или путем расчета методом конформных отображений. Однако применение этих методов ввиду их большой трудоемкости затруднительно, поэтому пользуются приближенными соотношениями, установленными соответствующими расчетами для разных форм полюсных наконечников.

Величина  $\alpha_\delta$  называется расчетным коэффициентом полюсной дуги

$$\alpha_\delta = b_\delta / \tau .$$

Для машин с дополнительными полюсами:  $\alpha_\delta = 0,6 - 0,75$  и для машин без дополнительных полюсов  $\alpha_\delta = 0,70 - 0,85$ .

Длину якоря в осевом направлении  $l_a$  часто принимают на 5 – 10 мм больше длины полюсов  $l_m$ . при этом индукция на конце якоря ослабляется (рис. 1.9) и поток, входящий в торец якоря, уменьшается. В результате уменьшаются потери на вихревые токи во фланцах и в середине якоря от торцевого потока. Расчетная длина якоря в данном случае определяется по выражению

$$l_\delta = \frac{l_a + l_m}{2} .$$

Индукция в воздушном зазоре  $B_{\delta n}$  определяется по графику рис.1.4., таким образом, магнитный поток

$$\Phi_{\delta n} = B_{\delta n} l_\delta b_\delta ,$$

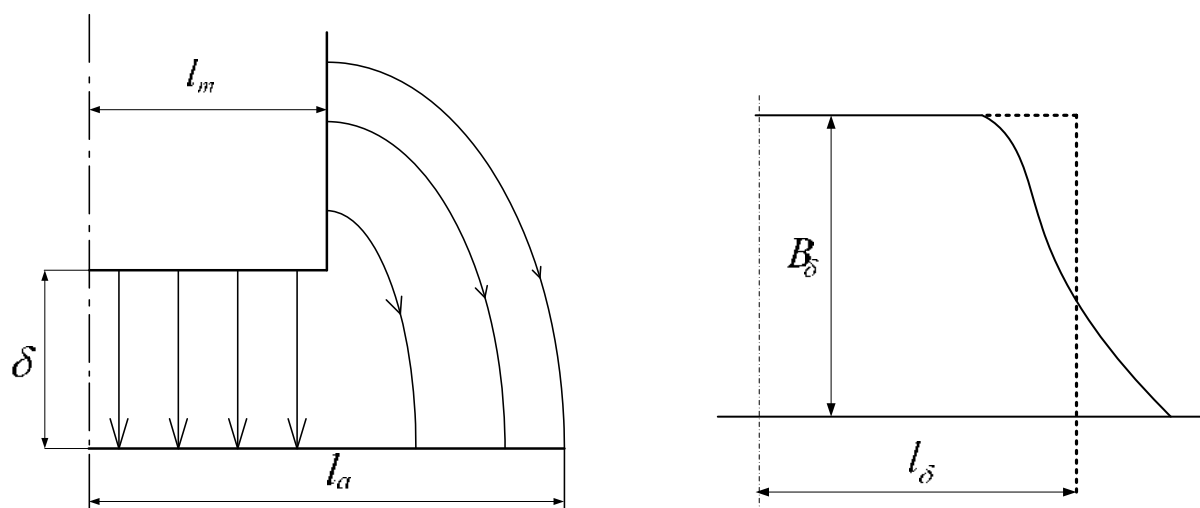


Рис. 1.9. Магнитное поле у края сердечника якоря

где  $b_\delta = \alpha_\delta \tau$  - расчетное полюсное деление.

Магнитодвижущая сила (МДС) в воздушном зазоре при гладком якоре

$$F_\delta = H_\delta \delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0} .$$

МДС с учетом влияния пазов

$$F_{\delta} = K_{\delta 1} \frac{B_{\delta} \delta}{\mu_0},$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

Следующей по сложности магнитного поля является зубцовая зона. Магнитное напряжение этой зоны с достаточной для практических целей точностью можно рассчитать с использованием следующей методики.

Первоначально определяются зубцовые коэффициенты для трех сечений:

в верхней части зубца

$$K_{z1} = \frac{t_1 l_{\delta}}{b_{z1} l_a K_c},$$

в средней части зубца

$$K_{z2} = \frac{t_2 l_{\delta}}{b_{z2} l_a K_c},$$

и в нижней части зубца

$$K_{z3} = \frac{t_3 l_{\delta}}{b_{z3} l_a K_c},$$

где  $K_c$  – коэффициент заполнения сталью.

При этом должно соблюдаться следующее соотношение:  $K_{z3} > K_{z2} > K_{z1}$ .

Далее определяется расчетное значение магнитной индукции в сечениях зубца:

в верхней части зубца

$$B_{z1} = K_{z1} B_{\delta},$$

в средней части зубца

$$B_{z2} = K_{z2} B_{\delta},$$

в основании зубца

$$B_{z3} = K_{z3} B_{\delta}.$$

Здесь так же должно выполняться соотношение:  $B_{z3} > B_{z2} > B_{z1}$ .

При практических расчетах магнитное напряжение в зубцовой зоне якоря вычисляют приближенно, пользуясь формулой Симпсона

$$F_z = H_z h_z,$$

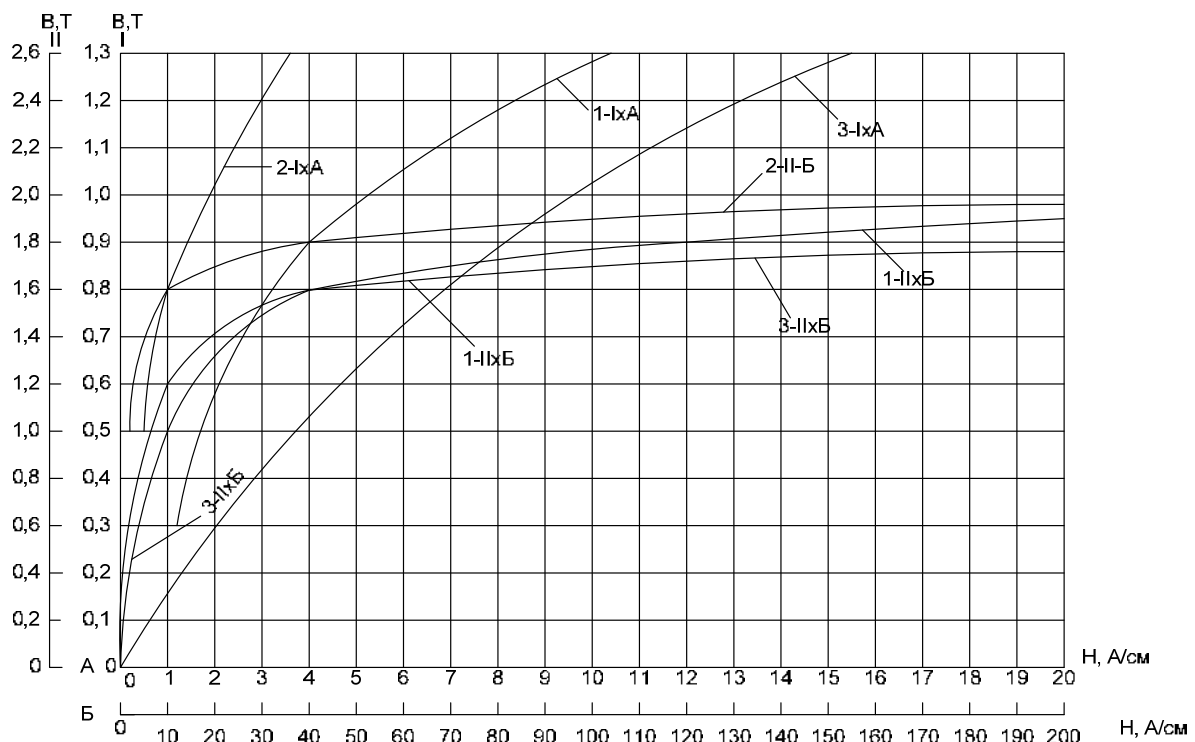
где  $H_z = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6}$  - усредненное значение напряженности маг-

нитного поля в зубцовой зоне  $H_i = f(B_{zi}, K_{zi})$ , где  $i = 1, 2, 3$  (в верхней  $i = 1$ , средней  $i = 2$  и нижней  $i = 3$  частях зубца);

$H_{z1}, H_{z2}, H_{z3}$  определяют по графику рис.1.5 по соответствующим значениям  $B_z$ . График представлен в виде семейства характеристик, построенных для разных значений зубцового коэффициента  $K_z$ .

Если  $B_z < 1,8T$ , то зубец не насыщен и в паз отвечает незначительная часть магнитного потока. Поэтому в данном случае можно пользоваться основной кривой намагничивания, приведенной в таблице 5 или на рис.1.10 (кривая 1). На этом рисунке совмещены характеристики электротехнических сталей, применяемых в МПТ. Для более точного определения численных величин зависимости  $B = f(H)$  представлены в виде двух масштабов:

$I \times A$  ( $1,3 T \times 20 A/cm$ ) и  $II \times B$  ( $2,6 T \times 200 A/cm$ ).



**Рис.1.10. Кривые намагничивания ферромагнитных материалов:**  
**1 – электротехническая сталь 1211, 1212, 1311; 2 – электротехническая сталь 3411**  
**(для полюсов); 3 – литая сталь (ст.3.). I x A – масштабы по осям I и A;**  
**II x B – масштабы по осям II и B**

Магнитные напряжения сердечника якоря, полюсов и ярма относительно малы и могут рассчитываться более приближенно.



Поток  $\Phi_\delta$  разветвляется в спинке сердечника якоря на две части (рис.1.3), и средняя индукция в спинке

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2l_a h_a k_c}.$$

Высоту спинки якоря  $h_a$  выбирают так, чтобы значение индукции в спинке якоря для номинального режима было в диапазоне, указанном в табл.1.

Индукция по сечению спинки якоря, а также вдоль магнитной линии на рис.1.3 несколько изменяется. Однако магнитное напряжение сердечника якоря относительно мало. Поэтому  $H_a = f(B_a)$ , определяется по кривой намагничивания для электротехнической стали рис.1.10 (кривая 1) или по таблице 5. Магнитное напряжения спинки якоря

$$F_a = H_a L_a,$$

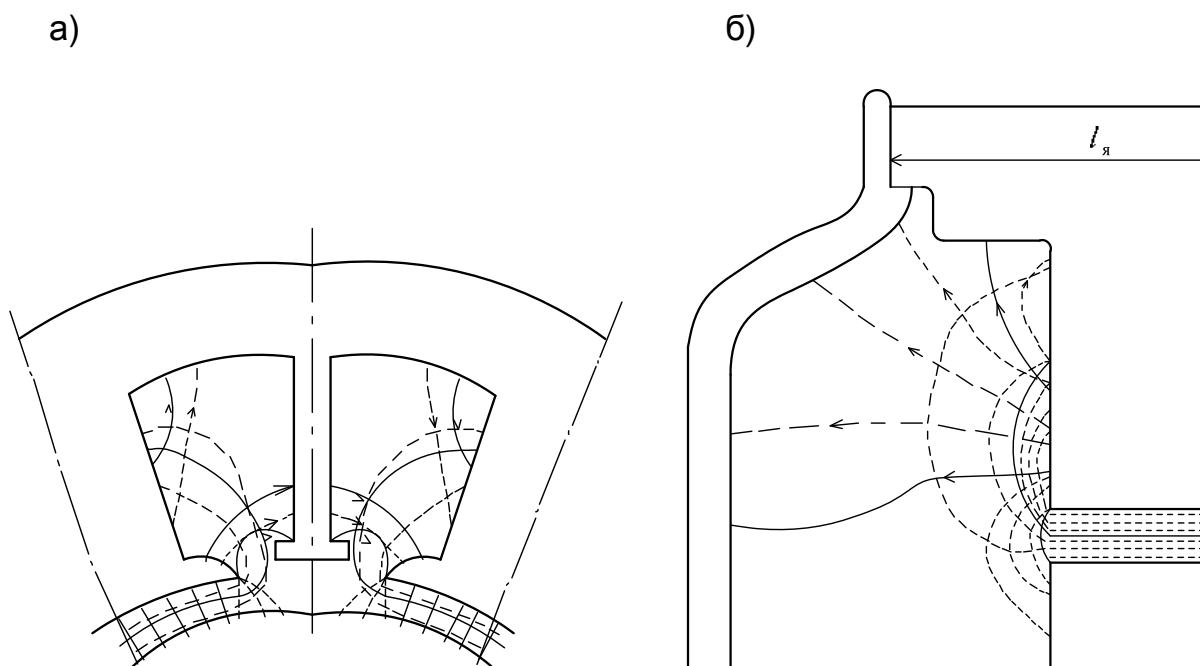
где  $L_a$  – длина средней силовой линии спинки якоря, которую можно вычислить приближенно по следующей формуле:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2}.$$

При расчете магнитных напряжений полюсов и ярма необходимо учесть, что обмотка возбуждения создает, кроме потока  $\Phi_\delta$ , также поток рассеяния  $\Phi_G$ , который охватывает обмотку возбуждения и проходит минуя воздушный зазор, между полюсными наконечниками и якорем, через сердечники полюсов и ярмо (рис.1.11).

Величина  $G$  называется коэффициентом рассеяния полюсов и может быть рассчитана по приближенным формулам

$$G = \frac{\Phi_\delta = \Phi_G}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_G}{\Phi_\delta}.$$



**Рис.1.11. Поток рассеяния обмотки возбуждения между полюсами (а) и торцевой области (б)**

В МПТ обычно  $G = 1,10 - 1,25$ , причем большие значения относятся к многополюсным машинам с дополнительными полюсами, а меньшие – к машинам без дополнительных полюсов.

При известном значении  $G$  определяется индукция в сердечниках главных полюсов

$$B_m = \frac{G\Phi_\delta}{l_m b_m k_c}.$$

Ширину полюса  $b_m$  выбирают так, чтобы значение индукции полюса для номинального режима было в диапазоне, указанном в табл.1.  $H_m = f(B_m)$ , определяется по кривой намагничивания листовой электротехнической стали марки 3411 рис.1.10 (кривая 2) или по таблице 6.

Магнитное напряжение полюса

$$F_m = H_m h_m.$$

Индукция в ярме

$$B_я = \frac{G\Phi_\delta}{2h_я l_я},$$

где  $h_{я}$  – высота (толщина) ярма;

$l_{я} = l_m + 0,4D_a$  – длина ярма в осевом направлении.

Высоту ярма  $h_{я}$  выбирают так, чтобы индукция в ярме была в диапазоне, указанном в табл.1.  $H_{я} = f(B_{я})$ , определяется по кривой намагничивания для литой стали марки Ст.3 (кривая 3) рис.1.10 или по таблице 7.

Магнитное напряжение ярма

$$F_{я} = H_{я} L_{я},$$

где  $L_{я}$  – длина средней силовой линии в ярме.

$$L_{я} = \frac{\pi[D_a + 2(\delta + h_m) + h_{я}]}{4p} + \frac{h_{я}}{2}.$$

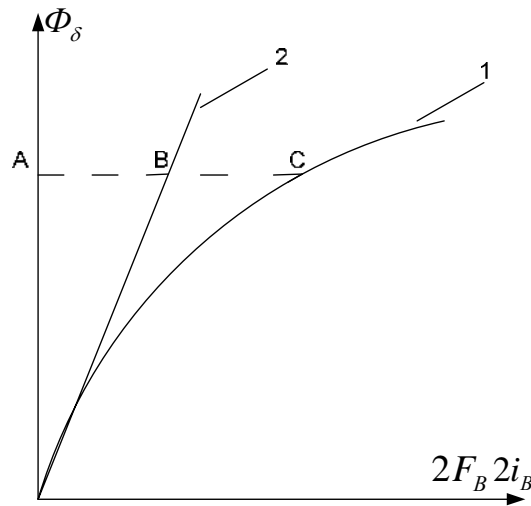
Выше предполагалось, что пазы в полюсных наконечниках отсутствуют. При наличии таких пазов рассчитывается также магнитное напряжение для зубцового слоя полюсных наконечников, а  $h_m$  при нахождении  $F_m$  соответственно уменьшается. Сложив вычисленные магнитные напряжения участков магнитной цепи, получим сумму магнитных напряжений машины на один полюс.

$$F_B = F_{\delta} + F_z + F_a + F_m + F_{я} = i_B w_B$$

и на пару полюсов

$$2F_B = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_a + 2F_m + 2F_{я} = 2i_B w_B.$$

Для построения магнитной характеристики МПТ следует повторить расчет  $F_B$  для ряда значений основного потока  $\Phi_{\delta n}$  ( $0,5 \Phi_{\delta n}$ ;  $0,75 \Phi_{\delta n}$ ;  $0,9 \Phi_{\delta n}$ ;  $1,1 \Phi_{\delta n}$ ;  $1,25 \Phi_{\delta n}$ ). Результаты вычислений оформляются в виде таблицы 3 и по ним строится зависимость  $\Phi_{\delta} = f(2i_B)$  или  $\Phi_{\delta} = f(2F_B)$  (рис.1.12, кривая 1), которые отличаются только масштабом по оси абсцисс. Такие зависимости называются кривыми намагничивания или магнитными характеристиками машины.



**Рис.1.12. Магнитная характеристика машины**

Начальная прямолинейная часть магнитной характеристики соответствует насыщению магнитной цепи, когда магнитные напряжения ферромагнитных участков этой цепи весьма малы по сравнению с  $F_\delta$ . Поэтому, если провести касательную 2 к начальной части кривой 1 (рис.1.12), то она представит собой зависимость  $\Phi_\delta = f(2F_\delta)$ . Разность абсцисс кривой 1 и кривой 2 равна магнитным напряжениям ферромагнитных участков магнитной цепи.

Степень насыщения магнитной цепи характеризуется коэффициентом насыщения.

$$k_{\mu \text{анал.}} = \frac{2F_B}{2F_\delta} = \frac{F_B}{F_\delta} = 1 + \frac{F_z + F_a + F_m + F_y}{F_\delta}.$$

Этот же коэффициент можно определить графически, с помощью магнитной характеристики машины (рис.1.12)

$$k_{\mu \text{граф}} = \frac{AC}{AB} = 1 + \frac{BC}{AB}.$$

По результатам сравнения, ошибка  $\delta$  при нахождении  $k_\mu$  разными методами не должна превышать 5%

$$\delta = \frac{|k_{\mu \text{анал}} - k_{\mu \text{граф}}|}{k_{\mu \text{анал}}} \cdot 100\% \leq 5\%.$$

Строить машину с ненасыщенной магнитной цепью невыгодно, т.к. при этом материалы будут недоиспользованы и машина получится тяжелой.

Нецелесообразно также строить машину с чрезвычайно насыщенной магнитной цепью, т.к. в этом случае  $F_B$  велико и необходимо выполнить мощную обмотку возбуждения с большим расходом меди или алюминия и с большими потерями мощности на возбуждения. По этим причинам электрические машины изготавливаются с умеренным насыщением при номинальном режиме. Рабочая точка МПТ располагается на перегибе характеристики, соответствующему режиму насыщения магнитной цепи. В этом случае магнитная система машины используется оптимально.

В рассматриваемом случае рабочая точка лежит несколько выше колена магнитной характеристики (около точки  $C$  на рис.1.12). Обычно при номинальном магнитном потоке  $k_\mu = 1,20 - 1,35$ , в некоторых случаях допускается увеличение до  $1,70 - 2$ .

### 1.3. Пример расчета магнитной цепи машины постоянного тока

Данные для расчета:

1. Диаметр якоря  $D_a = 294 \text{ мм}$ ;
2. Активная длина якоря  $l_a = 240 \text{ мм}$ ;
2. Число пар полюсов  $p = 2$ ;
3. Расчетный коэффициент полюсной дуги  $\alpha_\delta = 0,67$ ;
4. Отношение  $t_1 / b_{z3} = 3,9$ ;
5. Воздушный зазор  $\delta = 3 \text{ мм}$ ;
6. Высота паза  $h_z = 40 \text{ мм}$ ;
7. Высота главного полюса  $h_m = 73 \text{ мм}$ ;
8. Коэффициент магнитного рассеяния  $G = 1,1$ ;
10. Число пазов якоря  $Z = 39$ .

Номинальная магнитная индукция в воздушном зазоре (определяется по графику рис.1.4)  $B_{\text{ном}} = 0,72 \text{ Т}$ .

1.Определение геометрических размеров машины постоянного тока.

Полюсное деление:

$$\tau = \pi D_a / 2p = \frac{3,14 \cdot 0,294}{2 \cdot 2} = 0,231 м ,$$

где  $D_a$  – диаметр якоря;

$p$  – число пар полюсов.

Зубцовое деление:

верхней части зубца

$$t_1 = \pi D_a / z = \frac{3,14 \cdot 0,294}{39} = 0,024 м ,$$

у основания

$$t_3 = \pi ( D_a - 2h_z ) / z = \frac{3,14 \cdot ( 0,294 - 2 \cdot 0,04 )}{39} = 0,017 м ,$$

где  $z$  – число пазов якоря;

$h_z$  – высота паза;

посередине

$$t_2 = \frac{t_1 + t_3}{2} = \frac{0,024 + 0,017}{2} = 0,0205 м .$$

Ширина зубца у основания:

$$b_{z3} = \frac{t_1}{t_1 / b_{z3}} = \frac{0,024}{3,9} = 0,00615 м ,$$

размер паза:

$$b_n = t_3 - b_{z3} = 0,017 - 0,00615 = 0,01085 м .$$

Ширина зубца:

в верхней части

$$b_{z1} = t_1 - b_n = 0,024 - 0,01085 = 0,01315 м ,$$

посередине

$$b_{z2} = 1/2 ( b_{z1} + b_{z3} ) = 1/2 ( 0,01315 + 0,00615 ) = 0,00965 м .$$

Расчетная длина воздушного зазора:

$$l_{\delta} = \frac{l_a + (l_a - 0,005)}{2} = \frac{0,240 + (0,240 - 0,005)}{2} = 0,2375 \text{ м}.$$

2.Определение зубцового коэффициента.

Верхняя часть зубца:

$$K_{z1} = \frac{t_1 l_{\delta}}{b_{z1} l_a K_c} = \frac{0,024 \cdot 0,2375}{0,01315 \cdot 0,24 \cdot 0,95} = 1,901,$$

средняя часть зубца

$$K_{z2} = \frac{t_2 l_{\delta}}{b_{z2} l_a K_c} = \frac{0,0205 \cdot 0,2375}{0,00965 \cdot 0,24 \cdot 0,95} = 2,213$$

и в нижней части зубца

$$K_{z3} = \frac{t_3 l_{\delta}}{b_{z3} l_a K_c} = \frac{0,017 \cdot 0,2375}{0,00615 \cdot 0,24 \cdot 0,95} = 2,88,$$

где  $K_c = 0,95$  – коэффициент заполнения сталью.

3.Определение номинальных значений индукции, магнитного потока, МДС в воздушном зазоре.

Магнитный поток:

$$\Phi_{\delta H} = B_{\delta H} l_{\delta} b_{\delta},$$

где  $b_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau$  - расчетное полюсное деление.

$$b_{\delta} = 0,67 \cdot 0,231 = 0,15477 \text{ м},$$

$$\Phi_{\delta H} = 0,72 \cdot 0,2375 \cdot 0,15477 = 0,0265 \text{ Вб}.$$

МДС в воздушном зазоре:

$$F_{\delta} = H_{\delta} \delta = \frac{B_{\delta} \delta}{\mu_0} k_{\delta 1},$$

где  $k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta}$  - коэффициент воздушного зазора, вызванный зубчатостью якоря.

$$\gamma_1 = \frac{(b_n / \delta)^2}{5 + b_n / \delta} = \frac{(0,01085 / 0,003)^2}{5 + 0,01085 / 0,003} = 1,516;$$

$$k_{\delta 1} = \frac{0,024}{0,024 - 0,003 \cdot 1,516} = 1,234;$$

$$F_{\delta} = \frac{0,72}{4\pi 10^{-7}} 0,003 \cdot 1,1234 = 2122,17 \text{ A}.$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная.

4. Определение расчетного значения магнитной индукции в зубе:  
в верхней части зубца

$$B_{z1} = K_{z1} B_{\delta} = 1,901 \cdot 0,72 = 1,369 \text{ T},$$

в средней части зубца

$$B_{z2} = K_{z2} B_{\delta} = 2,213 \cdot 0,72 = 1,593 \text{ T},$$

в основании зубца

$$B_{z3} = K_{z3} B_{\delta} = 2,88 \cdot 0,72 = 2,074 \text{ T}.$$

5. Определение напряженности магнитного поля и магнитного напряжения в зубцовой зоне якоря.

Определяем по выражению усреднения Симпсона

$$H_z = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6}$$



где  $H_i = (B_{zi}, k_{zi}), i = 1, 2, 3$ .

По графику намагничивания ферромагнитных материалов (рис.1.5, 1.8 или по таблице 5) определяется:

$$H_{z1} = 1430 \text{ A/м},$$

$$H_{z2} = 4120 \text{ A/м},$$

$$H_{z3} = 25000 \text{ A/м},$$

$$H_z = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6} = \frac{1430 + 4 \cdot 4120 + 25000}{6} = 7151 \text{ A/м}.$$

Магнитное напряжение в зубцовой зоне якоря:

$$F_z = H_z h_z,$$

где  $h_z$  – высота паза.

$$F_z = 7151 \cdot 0,04 = 286 \text{ A}.$$

6. Определение индукции, напряженности магнитного поля и магнитного напряжения в спинке якоря.

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2l_a h_a k_c},$$

где  $h_a$  – высота спинки якоря.

$$1,0 \leq B_a \leq 1,5 \text{ T}.$$

Принимаем  $B_a = 1,3 \text{ T}$  и по кривой намагничивания определяем напряженность магнитного поля якоря:

$$H_a = 1140 \text{ A/м},$$

$$h_a = \frac{\Phi_\delta}{2l_a B_a k_c} = \frac{0,0265}{2 \cdot 0,24 \cdot 1,3 \cdot 0,95} = 0,045 \text{ м},$$

$$F_a = H_z L_a ,$$

где

$$L_a = \frac{\pi(D_a - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2} - \text{длина средней силовой линии спинки якоря,}$$

$$L_a = \frac{3,14 \cdot (0,294 - 2 \cdot 0,04 - 0,045)}{4 \cdot 2} + \frac{0,045}{2} = 0,0888 \text{ м} ,$$

$$F_a = 1140 \cdot 0,0888 = 101,32 \text{ А} .$$

7. Определение индукции, напряженности магнитного поля и магнитного напряжения в сердечнике главных полюсов.

$$B_m = \frac{G\Phi_\delta}{l_m b_m k_c} ,$$

$$l_m = l_a - 0,005 = 0,24 - 0,005 = 0,235 \text{ м} ,$$

$$1,2 \leq B_{mn} \leq 1,6 \text{ Т} ,$$

$$B_{mn} = 1,4 \text{ Т} ,$$

$$b_m = \frac{G\Phi_\delta}{I_m B_M k_c} = \frac{1,1 \cdot 0,0265}{0,235 \cdot 1,4 \cdot 0,95} = 0,0933 \text{ м} .$$

$H_m = 500 \text{ А/м}$  (определили по кривой намагничивания рис.1.10, кривая 2, или по таблице 6 );

$$F_m = H_m h_m = 500 \cdot 0,073 = 36,5 \text{ А} .$$

8. Определение индукции, напряженности магнитного поля и магнитного напряжения в ярме.

$$B_я = \frac{G\Phi_\delta}{2h_я l_я} ,$$

$$1,1T \leq B_{ян} \leq 1,2T,$$

где  $h_{я}$  – высота ярма

$$h_{я} = \frac{G\Phi_{\delta}}{2l_{я}B_{я}} = \frac{1,1 \cdot 0,0265}{2 \cdot 0,353 \cdot 1,15} = 0,0359 \text{ м},$$

$$B_{я} = 1,15T,$$

$$l_{я} = l_m + 0,4D_a = 235 + 0,4 \cdot 294 = 352,6 \text{ мм или } 0,353 \text{ м},$$

$$L_{я} = \frac{\pi[D_a + 2(\delta + h_m) + h_{я}]}{4\rho} + \frac{h_{я}}{2} - \text{длина средней силовой линии яр-}$$

ма.

$$L_{я} = \frac{3,14 \cdot [0,294 + 2(0,003 + 0,073) + 0,0359]}{8} + \frac{0,0359}{2} = 0,207 \text{ м}.$$

$H_{я} = 1187 \text{ А/м}$  (определяется по кривой намагничивания рис.1.10, кривая 3, или по таблице 7).

$$F_{я} = 1187 \cdot 0,207 = 245,7 \text{ А}.$$

9. Определяем сумму магнитных напряжений всех участков магнитной цепи на пару полюсов:

$$2F_B = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_a + 2F_m + 2F_{я} = 2i_B w_B,$$

$$2F_B = 2 \cdot 2122,17 + 2 \cdot 286 + 2 \cdot 101,32 + 2 \cdot 36,5 + 2 \cdot 245,7,$$

$$2i_B w_B = 5583,4 \text{ А}.$$

Повторяем расчет с п.3 по п.9 и определяем сумму магнитных напряжений участков цепи на пару полюсов для значений  $0,5 \Phi_{\deltaн}$ ;  $0,75 \Phi_{\deltaн}$ ;

$0,9\Phi_{\delta n}; 1,1 \Phi_{\delta n}; 1,25 \Phi_{\delta n}$ . Результаты расчета магнитной цепи сводим в таблицу 3.

По полученным данным строим магнитную характеристику МПТ – зависимость  $F_B = f(\Phi_{\delta})$  (рис. 1.13).

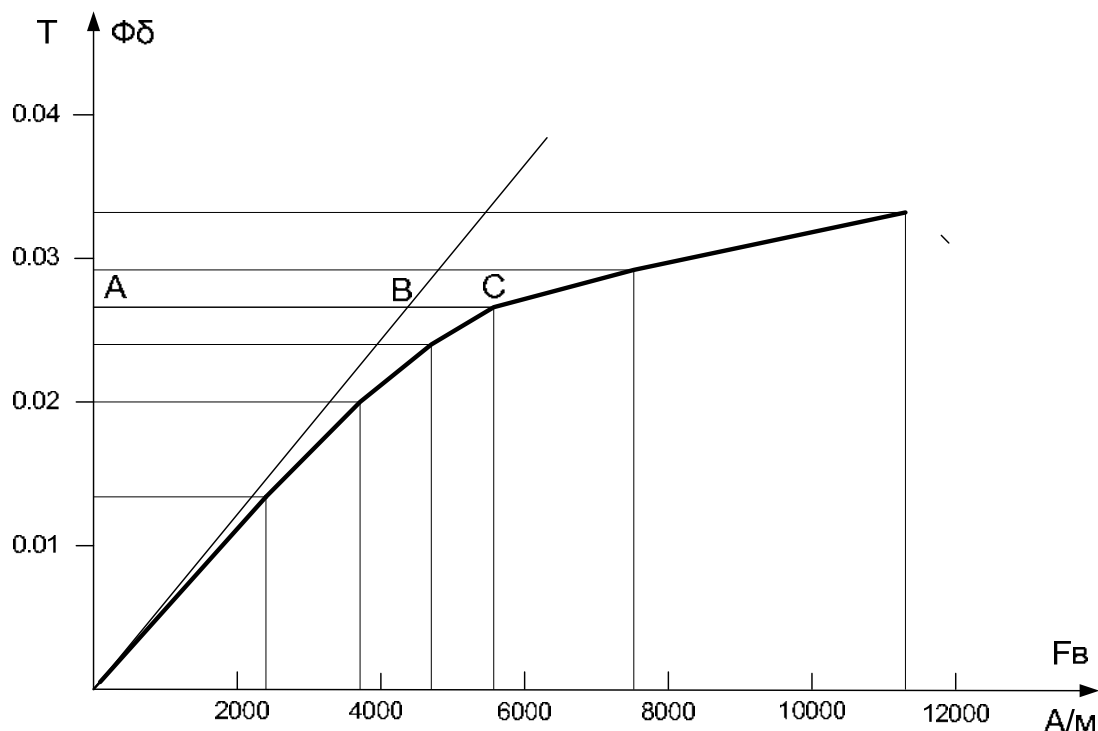


Рис. 1.13. Магнитная характеристика машины

10. Определяем коэффициент насыщения магнитной цепи МПТ.

Графическое определение, по результатам построения магнитной характеристики МПТ (рис.1.13)

$$k_{\mu\text{граф}} = \frac{AC}{AB} = 1 + \frac{BC}{AB} = 1 + \frac{15}{55} = 1,272.$$

Аналитическое определение, по результатам расчета магнитной характеристики МПТ (табл. 3)

$$k_{\mu\text{анал.}} = \frac{F_B}{F_{\delta}} = 1 + \frac{F_z + F_a + F_m + F_{\text{я}}}{F_{\delta}} = \frac{5583,4}{4244,34} = 1,315.$$

Определяем процент расхождения

$$\delta = \frac{|k_{\mu\text{анал}} - k_{\mu\text{граф}}|}{k_{\mu\text{анал}}} \cdot 100\% = \frac{|1,315 - 1,272|}{1,315} \cdot 100\% = 3,34\%.$$

Полученное значение входит в допуск (до 5%), что доказывает правильность выполнения аналитических расчетов и графических построений магнитной характеристики машины постоянного тока.

11. Выполняем построение эскиза магнитной цепи МПТ.

Проводим в соответствии с заданием.

Пример выполнения представлен на рис. 1.14.

#### 1.4. Задание для расчета магнитной цепи машины постоянного тока

Варианты исходных данных для расчета представлены в таблице 4.

Номер задания предлагается из трех цифр:

- последняя, третья цифра определяет номер столбца с исходными данными, соответственно правая часть таблицы;
- первая и вторая цифры определяют номер строки, по которой следует выбирать значение параметра в столбце.

Таблица 3

**Результаты расчета магнитной цепи МПТ**

Наименование величин	При значениях магнитного потока					
	$0,5\Phi_{\delta n}$	$0,75\Phi_{\delta n}$	$0,9\Phi_{\delta n}$	$1,0\Phi_{\delta n}$	$1,1\Phi_{\delta n}$	$1,25\Phi_{\delta n}$
Основной магнитный поток, $B\delta$	0,0132	0,01988	0,0239	0,0265	0,0292	0,03313
Магнитная индукция в воздушном зазоре, $T$	0,36	0,54	0,648	0,72	0,792	0,9
Магнитная индукция, $T$						
в верхней части зубца	0,6845	1,0268	1,2321	1,369	1,5059	1,7113
в средней части зубца	0,7965	1,195	1,434	1,593	1,752	1,991
в нижней части зубца	1,037	1,556	1,867	2,074	2,281	2,593
Магнитная индукция, $T$						
В полюсах	0,7	1,05	1,26	1,4	1,54	1,75
В спинке якоря	0,65	0,975	1,17	1,3	1,43	1,625
В ярме	0,575	0,8625	1,035	1,15	1,265	1,4375
Напряженность магнитного поля в зубцовой зоне, $A/m$						
$H_{z1}$	253	539	918	1430	2640	10100
$H_{z2}$	318	830	1780	4120	10100	24300
$H_{z3}$	555	745	14000	25000	90000	160000
$H_z = 1/6(H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3})$	346,7	767,3	3673	7151	22173	44550

Продолжение таблицы 3

Наименование величин	При значениях магнитного потока					
	Напряженность магнитного поля участков, А/м					
Полюсов $H_m$	80	190	330	500	820	2500
Спинки якоря $H_a$	236	475	779	1140	1780	5220
Ярма $H_y$	468	755	975	1187	1470	2370
МДС воздушного зазора $F_\delta, A$	1061,08 5	1591,63	1909,95	2122,17	2334,39	2652,71
	Магнитное напряжение, А					
Зубцовой зоны якоря $F_z$	13,9	30,7	146,92	286	886,2	1782
Полюсов $F_m$	5,84	13,87	24,1	36,5	59,86	182,5
Спинки якоря $F_a$	21	42,180	69,18	101,32	158,06	541,68
Ярма $F_y$	96,9	156,29	201,83	245,7	304,29	490,6
Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи на пару полюсов, $2 F_B, A$	2397,5	3669,3	4703,9	5583,4	7485,6	11298,96

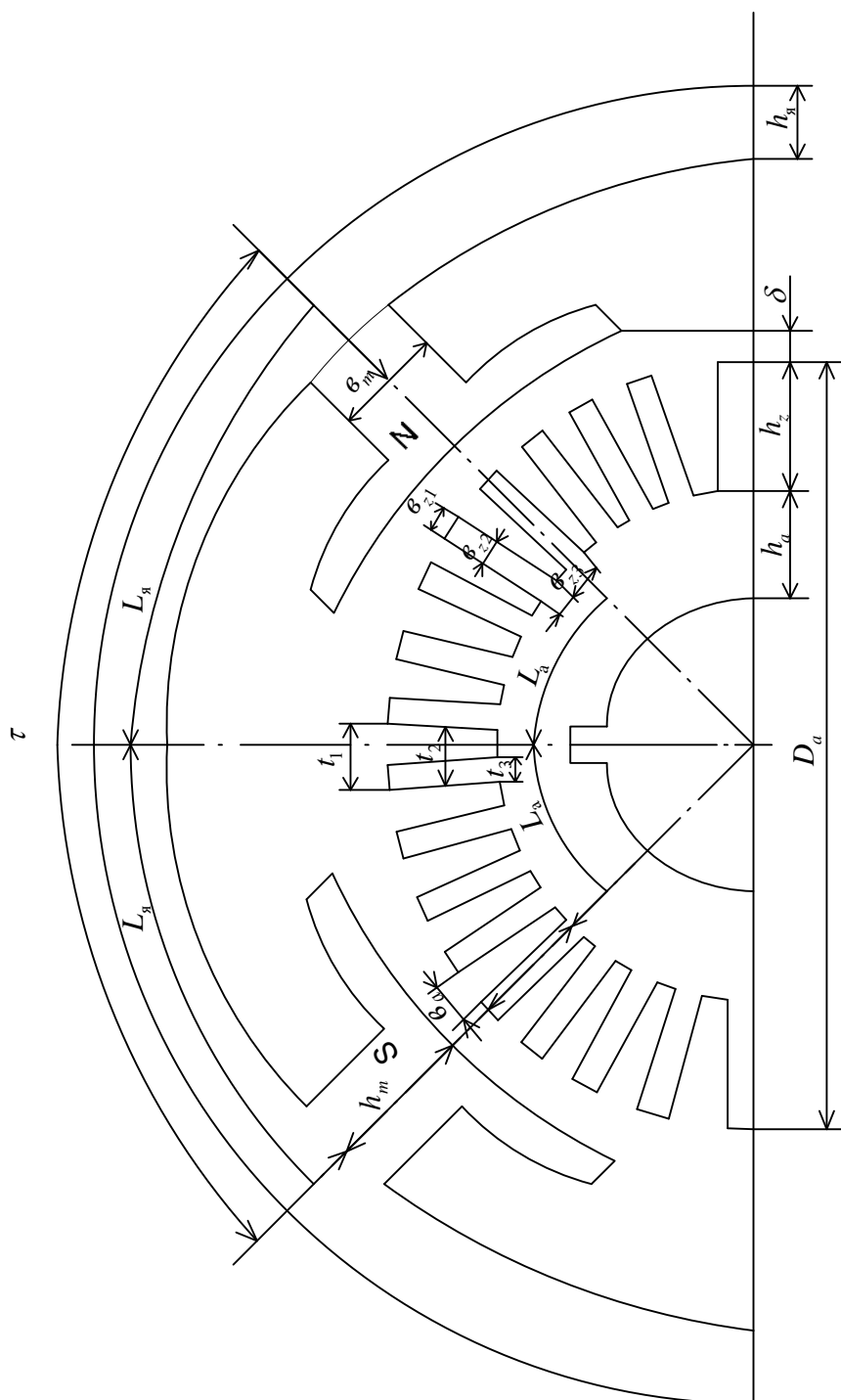


Рис.1.14. Эскиз магнитной цепи МРТ для одной пары полюсов ( $2p=4$ )

Таблица 4

## Исходные данные для расчета магнитной цепи МПТ

Наименование величины	Номера вариантов											
	по первой цифре шифра	по второй цифре шифра	по последней, третьей цифре шифра									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Диаметр якоря $D_a$ , мм	0-9	0,2,4,6,8	245	493	327	368	228	330	395	480	280	470
	0-9	1,3,5,7,9	261	450	294	380	220	320	340	493	210	420
Активная длина якоря $l_a$ , мм	0-9	0,1	245	460	240	370	290	330	320	345	260	360
	0-9	2,3	240	330	230	360	320	340	310	340	250	370
	0-9	4,5	235	320	280	330	310	385	280	290	245	340
	0-9	6,7	230	240	245	260	300	335	276	330	240	350
	0-9	8,9	245	250	255	280	315	350	270	300	245	345
Число пар полюсов $p$	0-9	0-9	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Расчетный коэффициент полюсной дуги $\alpha\delta$	0,2,4,6,8	0-9	0,64	0,68	0,67	0,71	0,72	0,69	0,66	0,7	0,68	0,65
	1,3,5,7,9	0-9	0,68	0,72	0,65	0,7	0,69	0,65	0,68	0,72	0,7	0,67
Отношение $t1/bz3$	0,3,5,7,8	0-9	3	2,5	2,9	2,7	3,2	2,7	2,8	2,5	3	2,5
	1,2,4,6,9	0-9	3,2	2,6	3	2,8	3,3	2,9	3	2,6	3,1	2,6
Воздушный зазор $\delta$ , мм	0-9	0-9	2,5	4,7	3	3,5	2,2	3,3	3	4,5	2,7	4,2
Высота паза $h_z$ , мм	0-9	0-9	32	51	40	47	34	41	39	49	37	48
Высота главного полюса $h_m$ , мм	0-9	0-9	65	110	73	92	71	82	70	108	84	79
Коэффициент магнитного рассеяния $\sigma$	0-9	0-9	1,17	1,25	1,1	1,21	1,23	1,22	1,09	1,27	1,24	1,15
Число паз якоря $Z$	0-9	0,1,5,8	30	58	39	51	23	44	40	74	25	66
	0-9	2,3,7	31	59	40	52	24	45	41	75	26	67
	0-9	4,6,9	32	61	41	53	25	46	42	76	27	68



**Кривая намагничивания листовой электротехнической стали  
марок 1211, 1212 (для зубцовой зоны и спинки якоря)**

$B$ , $Tл$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H$ , $A/cm$									
0,4	1,40	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,6	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	4,12
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66,0	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122

**Кривая намагничивания стали 3411 (для полюсов)**

$B,$ $Tл$	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H, A/cm$									
1,0	1,70	1,70	1,80	1,85	1,90	1,90	2,0	2,0	2,10	2,10
1,1	2,20	2,20	2,30	2,35	2,40	2,40	2,50	2,60	2,60	2,70
1,2	2,80	2,9	3,0	3,10	3,20	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60
1,3	3,70	3,80	4,0	4,10	4,20	4,30	4,50	4,60	4,70	4,80
1,4	5,0	5,20	5,40	5,60	5,80	6,0	6,20	6,40	6,60	6,80
1,5	7,0	7,30	7,60	7,90	8,20	8,50	8,80	9,10	9,40	9,70
1,6	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,7	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	28,0	31,0	34,0	37,0
1,8	40,0	43,0	46,0	50,0	54,0	59,0	65,0	71,0	78,0	85,0
1,9	92,	100	112	130	155,	190	225,	260	300	350
2,0	400	450	500	550	600	-	-	-	-	-

**Кривая намагничивания литой стали, толстых листов (Ст.3), поковок  
(для ярма статора)**

<i>B, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/см</i>									
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,40	2,48	2,50	2,64	2,72	2,80	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,20	3,28	3,36	3,44	3,52	3,60	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,00	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,70	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,50	8,73	8,85	8,98	9,11
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,76
1,1	10,90	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
1,2	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0

## Контрольные вопросы

1. Материалы, применяемые в электромашиностроении.
2. Преобразование энергии в ЭМ.
3. Устройство и принцип действия машины постоянного тока в режиме генератора.
4. Устройство и принцип действия машины постоянного тока в режиме двигателя.
5. Объяснить построение расчетной части магнитной цепи МПТ.
6. Какие участки и почему входят в расчетную часть магнитной цепи МПТ?
7. Как определить сумму магнитных напряжений цепи на один полюс?
8. Какие значения индукции считаются допустимыми на разных участках магнитной цепи МПТ?
9. Что такое кривая намагничивания электротехнической стали?
10. Что такое коэффициент воздушного зазора?
11. Какая форма паза принимается в расчете?
12. Какая форма зубца принимается в расчете?
13. От чего зависит величина зубцового деления?
14. Как определяется расчетная полюсная дуга?
15. Что такое расчетная длина якоря?
16. От чего зависит МДС в воздушном зазоре МПТ?
17. Для чего определяется зубцовый коэффициент?
18. Что такое формула Симпсона?
19. Как определяется МДС в спинке якоря?
20. Как определяется МДС полюсов?
21. Как определяется МДС ярма?
22. Что такое магнитная характеристика МПТ?
23. Как можно построить магнитную характеристику МПТ?
24. Что такое коэффициент насыщения магнитной цепи?
25. Как аналитически определить коэффициент насыщения магнитной цепи МПТ?
26. Как графически определить коэффициент насыщения магнитной цепи МПТ?

## 2. Трансформаторы

### 2.1. Общие сведения и классификация силовых трансформаторов

#### 2.1.1. Основные определения

*Трансформатором* называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством магнитного поля одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

Различают *двухобмоточные трансформаторы*, имеющие две гальванически не связанные обмотки, *трех- и многообмоточные трансформаторы* с гальванически не связанными обмотками.

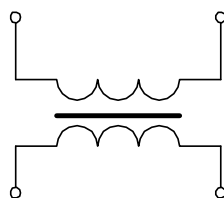


Рис. 2.1.1. Не связанные обмотки трансформатора

*Автотрансформатором* называется трансформатор, две или большее число обмоток которого гальванически связаны так, что они имеют общую часть. Передача энергии из первичной цепи во вторичную происходит как посредством магнитного поля, так и электрическим путем.

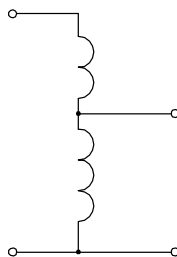


Рис. 2.1.2. Связанные обмотки трансформатора, имеющие общую часть

Трансформатор называется *силовым*, если он предназначен для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках для приема и использования электрической энергии. К силовым относятся трансформаторы трехфазные и многофазные мощностью  $6,3 \text{ кВА}$  и более, однофазные мощностью  $5 \text{ кВА}$  и более. При меньших мощностях трансформаторы называются трансформаторами *малой мощности*. Различают силовые трансформаторы *общего назначения*, предназначенные для включения в се-

ти, не отличающиеся особыми условиями работы, и *специальные* силовые трансформаторы для сетей и приемников с особыми условиями работы.

### 2.1.2. Классификация силовых трансформаторов общего назначения

#### **По системам охлаждения:**

а) *Естественное воздушное охлаждение* – элементы трансформатора имеют непосредственное соприкосновение с окружающим воздухом, охлаждение происходит путем излучения и естественной конвекции воздуха. Применяется для мощностей до 2500 кВА и напряжений до 20 кВА.

б) *Естественное масляное охлаждение* – активная часть трансформатора помещается в бак, заливаемый трансформаторным маслом, служащим изолирующей средой и теплоносителем. Охлаждение обмоток и магнитной системы происходит путем естественной конвекции масла, поверхности бака – путем излучения и естественной конвекции воздуха. Применяется для мощностей до 10 000 кВА.

в) *Масляное охлаждение с дутьем* – теплоотдача с поверхности бака усиливается путем обдувания поверхности вентиляторами при естественной конвекции масла внутри бака. Применяется для мощностей 10 000–63 000 кВА.

г) *Масляное охлаждение с принудительной циркуляцией масла* – масло из бака откачивается насосом, прогоняется через водяной или воздушный теплообменник и охлажденное возвращается в бак. Применяется для мощностей 16 000 – 25 000 кВА и более.

#### **По форме магнитной системы:**

Различают магнитные системы *плоские*, т.е. такие, в которых продольные оси всех стержней и ярм расположены в одной плоскости и *пространственные*, в которых эти оси расположены в разных плоскостях.

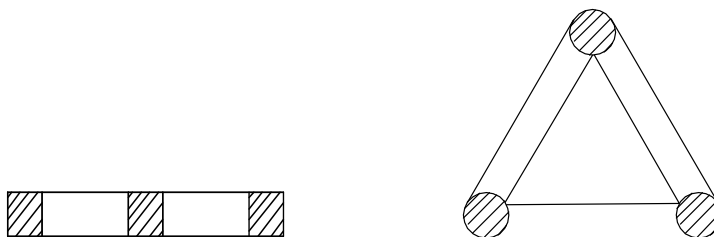
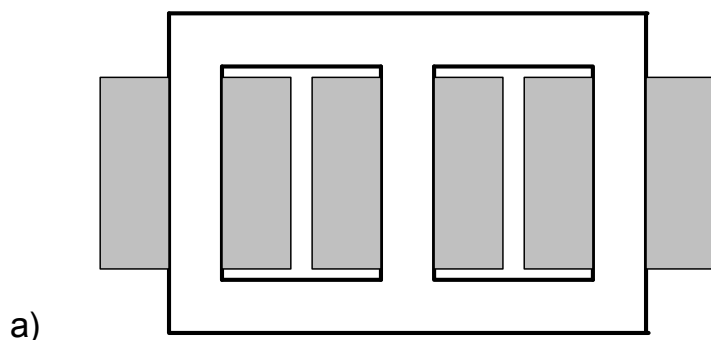


Рис.2.1.3. Плоская и пространственная системы

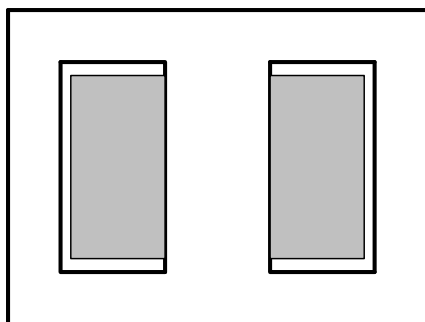
**По схеме магнитной системы:**

а) *Стержневые трансформаторы* – ярма, замыкающие магнитную цепь, прилегают к торцевым поверхностям обмоток, не охватывая их боковых поверхностей.

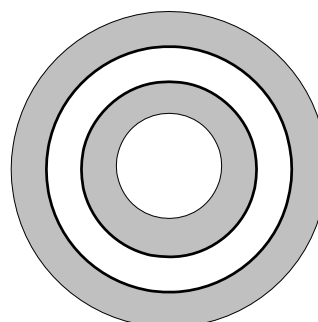


а)

б) *Броневые трансформаторы* – ярма охватывают не только торцевые, но и боковые поверхности обмоток, как бы «защищая» их броней.



б)



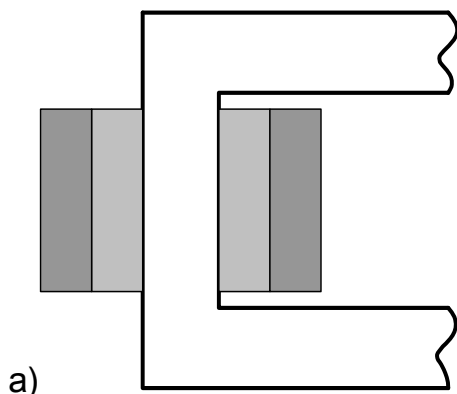
в)

в) *Тороидальные трансформаторы* – обмотки наматываются на кольцевой магнитопровод.

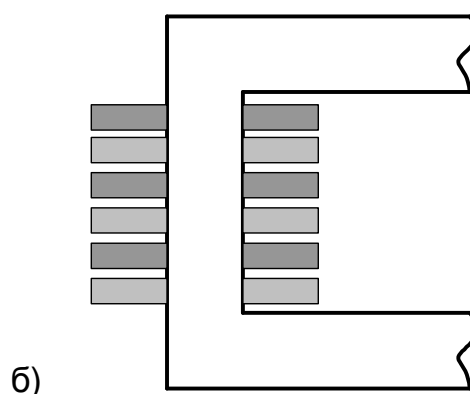
**Рис.2.1.4. Виды трансформаторов по схеме магнитной системы**

**По расположению обмоток:**

а) *Трансформаторы с concentric обмотками* – обмотки высокого и низкого напряжения (ВН и НН) выполняются в виде цилиндров и располагаются на стержне concentric.



а)



б)

**Рис.2.1.5. Виды трансформаторов по расположению обмоток**

б) *Трансформаторы с чередующимися обмотками* – обмотки ВН и НН выполняются в виде невысоких цилиндров и располагаются, чередуясь в осевом направлении.

В зависимости от мощности и класса напряжения силовые трансформаторы подразделяются на восемь *габаритов*:

Номера габаритов	Диапазон мощности, <i>кВА</i>	Класс напряжения, <i>кВ</i>
I	До 100	До 35 (включительно)
II	100 – 1 000	До 35 (включительно)
III	1 000 – 6 300	До 35 (включительно)
IV	Свыше 6 300	До 35 (включительно)
V	До 32 000	До 110 (включительно)
VI	32 000 – 80 000	До 330 (включительно)
VII	80 000 – 200 000	До 330 (включительно)
VII	Свыше 200 000	Выше 330

Для отличия по конструктивным признакам, назначению, мощности и напряжению все трансформаторы подразделяются на *типы*, которым присваивается условное обозначение. Структурная схема условного обозначения типа трансформатора имеет следующий вид:

$$\begin{array}{ccccc} \underline{X} & - & \underline{X} / \underline{X} & \underline{X} & - & \underline{X} \\ 1 & & 2 & 3 & & 4 & 5 \end{array}$$

- где
- 1 – буквенное обозначение типа;
  - 2 – номинальная мощность трансформатора, кВА;
  - 3 – класс напряжения обмотки ВН;
  - 4 – дополнительное буквенное обозначение;
  - 5 – климатическое исполнение и категория размещения.

Некоторые примеры обозначения *типов* трансформаторов:

ТМ – трансформаторы силовые масляные двухобмоточные общего назначения;

ТМН – то же, но с устройством переключения регулировочных отводов под нагрузкой (с устройством РПН);

ТДН – то же, что и для ТМН, но охлаждение с дутьем;

ТДНС – то же, что и для ТДН, но для собственных нужд электростанций;



ТМТН – то же, что и для ТМН, но трехобмоточный;

ТДТН – то же, что и для ТМТН, но охлаждение с дутьем;

ТД – трансформаторы силовые масляные общего назначения охлаждение с дутьем;

ТДЦ – то же, что и ТД но с охлаждением дутьем и принудительной циркуляцией масла;

ТРДН – то же, что и для ТДН, но с расщепленной обмоткой НН;

ТРДЦН – то же, что и для ТРДН, но с охлаждением дутьем и принудительной циркуляцией масла;

ТЦ – трансформаторы силовые масляные двухобмоточные общего назначения с принудительной циркуляцией масла;

ТНЦ – то же, что и для ТЦ, но с устройством РПН;

ТС – трансформаторы силовые трехфазные сухие общего назначения;

ТСЗ – то же, что и ТС, но защищенные;

ТСЗС – то же, что и ТСЗ но для собственных нужд электростанций;

ТСВ – трансформаторы рудничные силовые взрывобезопасные;

ТСШВ – трансформаторы сухие для угольных и сланцевых шахт, взрывобезопасные;

ТКШВС – то же, что и ТСШВ, но с кварцевым наполнением и изоляцией из стеклопластиков;

ТМП, ТДНПД – трансформаторы масляные для тиристорных электроприводов постоянного тока;

ОРЦ – двухобмоточный однофазный с расщепленной обмоткой и принудительной циркуляцией масла;

ОРДЦ – то же, что и для ОРЦ, но с охлаждением дутьем и принудительной циркуляцией масла;

ОСМ – однофазный сухой многоцелевого назначения для питания цепей управления, сигнализации и местного освещения;

АТДТН, АТДЦТН – автотрансформаторы с соответствующими параметрами для ТДТН и ТДЦТН.

Наиболее распространенные в распределительных сетях промышленных предприятий трехфазные двухобмоточные масляные трансформаторы с мощностями от 25 до 630 *кВА* могут иметь напряжения: ВН – 6, 10 и 35 *кВ* и НН – 0,4 и 0,69 *кВ*.

**Условные обозначения климатических исполнений  
трансформаторов:**

Климатические исполнения	Условные обозначения
Для эксплуатации в районах с умеренным климатом	У
То же, с умеренным и холодным климатом	УХЛ
То же, с влажным тропическим климатом	ТВ
То же, с сухим тропическим климатом	ТС
То же, как с сухим, так и влажным тропическим климатом	Т
Для эксплуатации во всех районах на суше, кроме районов с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	О
Для эксплуатации в районах с умеренно-холодным морским климатом	М
То же, с тропическим морским климатом	ТМ
То же, как с умеренно-холодным, так и тропическим морским климатом	ОМ
Для эксплуатации во всех районах на суше и на море, кроме районов с очень холодным климатом (всеклиматическое исполнение)	В

**Условные обозначения категорий размещения трансформаторов:**

Характеристика категорий размещения	Условные обозначения
Для эксплуатации на открытом воздухе	1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях со свободным доступом наружного воздуха	2
Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий	3
Для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемые климатическими условиями	4
Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью	5

Для регулирования напряжения трансформаторы снабжены устройствами ПБВ и РПН. Регулирование осуществляется за счет изменения числа рабочих

витков обмотки высокого напряжения, изменяя тем самым коэффициент трансформации.

ПБВ означает переключение обмоток без возбуждения, т.е. при выключенном трансформаторе. РПН означает: регулирование напряжения под нагрузкой (переключения регулировочных отводов под нагрузкой).

Трансформаторы мощностью от 25 до 250 кВА выпускаются только ПБВ  $\pm 2 \times 2,5\%$ , а мощностью 400 и 630 кВА – ПБВ и РПН.

Регулирование напряжения ПБВ  $\pm 2 \times 2,5\%$  осуществляется переключателем с выведенной рукояткой переключения в пределах от  $-5\%$  до  $+5\%$  через каждые 2,5%. Аппаратура РПН размещается в баке трансформатора. Переключение автоматическое или ручное.

Трансформаторы с РПН при напряжениях ВН 6 и 10 кВ в диапазоне регулирования  $\pm 10\%$  имеют не менее чем  $\pm 8$  ступеней и при напряжениях ВН 13,8; 15,75; 20 и 35 кВ в диапазоне  $\pm 9\%$  – не менее чем  $\pm 6$  ступеней.

Схемы и группы соединения трансформаторов:  $Y/Y_H - 0$  и  $Y/Z_H - 11$  при НН 0,4 кВ;  $D/Y_H - 11$  при НН 0,69 кВ и при НН 0,4 кВ у трансформаторов ТМ-400/10 и ТМ-630/10.

Нейтраль обмоток трансформаторов с напряжениями 6, 10 и 35 кВ изолирована от земли, а обмоток с напряжениями 110, 150, 220, 330 и 500 кВ заземлена наглухо или разземлена.

### 2.1.3. Номинальные данные и параметры трансформаторов

Номинальными данными называются указанные изготовителем параметры трансформатора (например, частота, мощность, напряжение, ток), обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативными документами.

Технические данные некоторых типов двухобмоточных силовых трансформаторов общего назначения приведены в таблице:

**Паспортные данные трансформаторов**

Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_K$ %	$i_0$ %	Габариты, мм			Масса, $m$
	$P_0$	$P_K$			$L$	$B$	$H$	
ТМ-25/10	0,13	0,6	4,5	3,2	1120	460	1125	0,38
ТМ-100/10	0,33	1,97	4,5	2,6	1200	800	1470	0,72
ТМ-630/10	1,31	8,5	5,5	2,1	1750	1275	2150	3,0
ТМН-6300/35	7,6	46,5	7,5	0,8	4250	3420	4080	16,6
ТДНС-63000/35	50	250	12,7	0,45	7000	4600	6400	75,0
ТДЦ-400000/110	320	900	10,5	0,45	15550	6800	7200	286

Из таблицы видно, что трансформатор ТДЦН-400000/110 (трансформатор силовой масляный общего назначения охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла, с устройством РПН) имеет номинальную мощность  $S_H = 400\,000\text{ кВА}$  (400 МВА), класс напряжения обмотки ВН  $U_{1H} = 110\text{ кВ}$ , потери холостого хода  $P_O = 320\text{ кВт}$ , потери короткого замыкания  $P_K = 900\text{ кВт}$ , напряжение короткого замыкания  $u_K = 10,5\%$  от  $U_{1H}$ , ток холостого хода  $i_0 = 0,45\%$  от номинального тока первичной обмотки.

## 2.2. Расчет параметров трансформатора по номинальным данным

### 2.2.1. Построение характеристик трансформаторов

В процессе производства и эксплуатации трансформаторы неоднократно подвергаются электрическим испытаниям. Категории и методики проведения испытаний оговорены в ГОСТе 16504-74, ОСТе 160.800.230-75, ГОСТах 3484-77, 20243-74, 8008-75 и др. Неотъемлемой частью как приемо-сдаточных, так и квалификационных испытаний, являются опыты холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ), позволяющие определить все основные параметры трансформатора.

*Холостым ходом* называется режим работы трансформатора, при котором первичная обмотка трансформатора включена на номинальное напряжение при разомкнутой вторичной обмотке ( $I_2 = 0$ ), рис.2.2.1. При этом по первичной обмотке протекает ток, который называется током холостого хода.

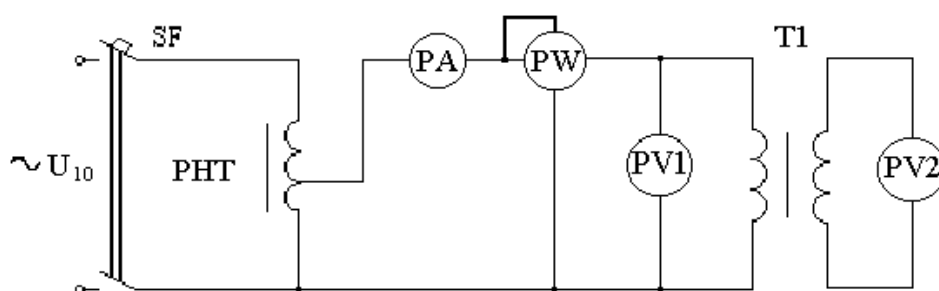


Рис.2.2.1. Опыт холостого хода

Режимом короткого замыкания называют режим работы при замкнутых накоротко зажимах вторичной обмотки трансформатора, рис.2.2.2. Режим КЗ, возникающий случайно в процессе эксплуатации при номинальном первичном напряжении, является аварийным процессом, сопровождающимся большими токами в обмотках.

Многократное повышение токов по сравнению с номинальными токами (в 10 -20 раз) может привести к повреждению изоляции обмоток

вследствие нагрева и к разрушению обмоток механическими силами, возникающими между обмотками.

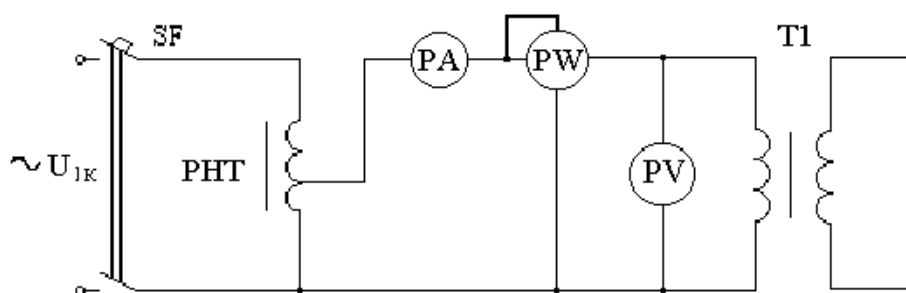


Рис.2.2.2. Опыт короткого замыкания

Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется напряжение, которое следует подвести к выводам первичной обмотки при замкнутой накоротко вторичной, чтобы в них установились номинальные токи.

Опыты холостого хода и короткого замыкания позволяют определить параметры  $T$ -образной схемы замещения трансформатора (рис.2.2.3), построить внешнюю характеристику и зависимость КПД от тока нагрузки.

Реальный трансформатор можно представить в виде некоторой электрической схемы замещения, по которой определяются величины: токи в первичной и вторичной обмотках  $I_1, I_2$ ,  $P_1$ , электрические и магнитные потери  $\Delta P_{эл}$ ,  $\Delta P_{м}$ . При этом электромагнитные процессы, протекающие в трансформаторе, эквивалентны процессам, протекающим в схеме замещения.

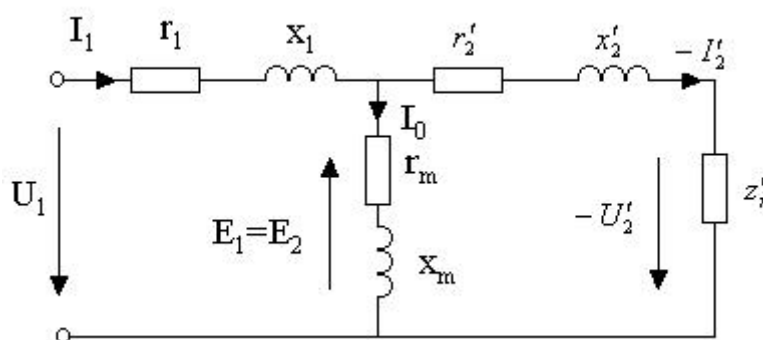


Рис.2.2.3.  $T$ -образная схема замещения трансформатора

Первичная обмотка электрически соединена со вторичной обмоткой.

Соответственно, токи, протекающие в ветвях схемы замещения можно объединить следующим выражением

$$I_1 = I_0 + (-I'_2),$$

где  $I_1$  - ток первичной обмотки трансформатора;

$I_0$  - ток холостого хода, протекающий в ветви намагничивания;

$-I'_2 = I_2 \cdot k_{mp}$  - приведенное значение тока вторичной обмотки  $I_2$ .

В реальном трансформаторе связь между обмотками магнитная, поэтому параметры вторичной обмотки приводятся к параметрам первичной обмотки. Для этого используются следующие выражения

$$E'_2 = E_2 \cdot K_{mp};$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{K_{mp}};$$

$$r'_2 = r_2 \cdot K_{mp}^2;$$

$$x'_2 = x_2 \cdot K_{mp}^2;$$

$$z'_n = z_n \cdot K_{mp}^2;$$

$$U'_2 = U_2 \cdot K_{mp},$$

где:  $r_1, r'_2$  – активные сопротивления, характеризующие электрические потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора;

$x_1, x'_2$  – индуктивные потери в обмотках трансформатора (от потоков рассеяния);

$z'_n$  – нагрузка во вторичной цепи;

$r_m, x_m$  – ветвь намагничивания;

$r_m$  – активные потери на вихревые токи и перемагничивание материала (нагрев магнитопровода);

$x_m$  – магнитные потери на создание основного потока.

**Опыт холостого хода** позволяет экспериментальным путем определить следующие параметры трансформатора ( $T_p$ ): коэффициент трансфор-

мации, величину намагничивающего тока, сопротивления намагничивающего контура, потери в стали сердечника трансформатора, часть параметров схемы замещения трансформатора.

Проводится по схеме рис. 2.2.1, при разомкнутой вторичной обмотке:  $i_2 = 0$ , и номинальном напряжении на первичной обмотке  $U_{10} = U_{ном}$ . По приборам, определяются значения

- тока первичной обмотки, тока ХХ,  $I_{10} = I_0$ ;
- напряжения на первичной обмотке,  $U_{10}$ ;
- напряжения на вторичной обмотке,  $U_{20}$ ;
- активные потери в режиме ХХ, эквивалентные нагреву магнитопровода,  $P_0$ .

По известной методике, производится обработка результатов эксперимента:

$$z_1 + z_m = \frac{U_{10}}{I_0};$$

$$r_1 + r_m = \frac{P_0}{I_0^2};$$

$$\cos f_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0};$$

$$x_1 + x_m = \sqrt{(z_1 + z_m)^2 - (r_1 + r_m)^2}.$$

При ХХ схема замещения  $Tr$  (рис.2.2.3) преобразуется в следующий вид

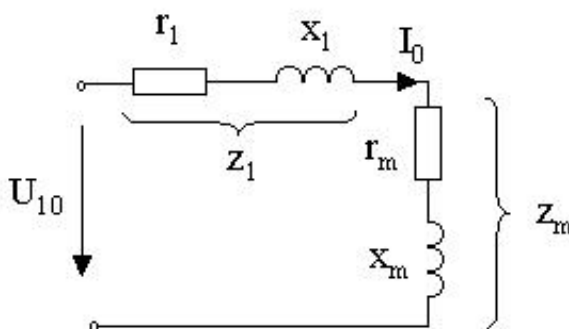


Рис.2.2.4. Схема замещения при ХХ

Ток холостого хода во много раз меньше номинального тока, поэтому электрическими потерями в первичной обмотке можно пренебречь, и поток

рассеяния во много раз меньше основного магнитного потока, поэтому  $r_1$  и  $x_1$  пренебрегаем.

Таким образом, из опыта ХХ определяем параметры ветви намагничивания - параметры  $r_m$  и  $x_m$ .

**Опыт короткого замыкания** позволяет экспериментальным путем определить следующие параметры  $Tr$ : напряжение короткого замыкания, величины активных сопротивлений обмоток трансформатора, индуктивных сопротивлений рассеяния и электрические потери в обмотках, часть параметров схемы замещения трансформатора.

Проводится по схеме рис. 2.2.2, при замкнутой накоротко вторичной обмотке:  $U_2 = 0$ , и пониженном напряжении на первичной обмотке  $U_1 = U_K$ , соответствующему номинальному значению тока в первичной обмотке  $I_K = I_{ном}$ . По приборам, определяются значения

- тока первичной обмотки, тока хх,  $I_1 = I_K$ ;
- напряжения на первичной обмотке,  $U_K$ ;
- активные потери в режиме КЗ, эквивалентные нагреву обмоток  $Tr$ ,  $P_K$ .

Обработка результатов эксперимента проводится по следующим выражениям

$$z_K = \frac{U_K}{I_K};$$

$$r_K = \frac{P_K}{I_K^2};$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2};$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K}.$$

При КЗ схема замещения  $Tr$  (рис.2.2.3) преобразуется в следующий вид



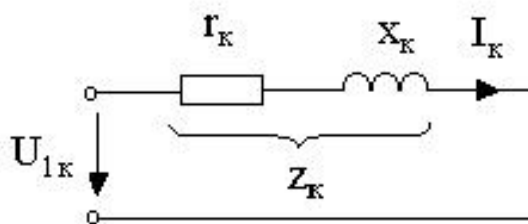


Рис.2.2.5. Схема замещения при КЗ

При КЗ, напряжение составляет  $U_K = 5...15\%$  от номинального значения. Соответственно, магнитный поток  $Tp$ , пропорциональный квадрату напряжения, будет так же много меньше номинального значения. При этом, магнитными потерями можно пренебречь, и убрать ветвь намагничивания из схемы замещения  $Tp$ .

Внешняя характеристика  $Tp$  определяет изменение вторичного напряжения при переменных нагрузках, зависимость  $U_2 = f(I_2)$  или  $U_2 = f(\beta)$ . Условия снятия характеристик – постоянство  $U_{ном}, f_1, \cos(\varphi_2)$ . Характеристики можно получить либо экспериментально, путем непосредственной загрузки  $Tp$ , либо расчетным путем, с использованием параметров схемы замещения. Исследовать реальный  $Tp$  опытным путем достаточно сложно, т.к. требуются реализовать практически соответствующие мощности регулируемой нагрузки, что в ряде случаев является трудновыполнимой задачей. Поэтому основным способом определения падения напряжения в  $Tp$  при изменении величины и характера нагрузки является расчетный способ.

Вторичное напряжение  $Tp$  при изменении нагрузки

$$U_2 = U_{20} - U_{20} \cdot \frac{\Delta U \%}{100},$$

где  $U_{20}$  – напряжение на вторичной обмотке при номинальном напряжении на первичной обмотке в режиме холостого хода;

$\Delta U \% = \beta \cdot (u_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + u_{Kp} \cdot \sin \varphi_2)$  - процентное изменение напряжения трансформатора при нагрузке,

где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$  - коэффициент загрузки;

$u_{ka}, u_{kp}$  – активное и реактивное составляющие напряжения КЗ, рассчитываются по параметрам схемы замещения  $Tr$ .

Семейство внешних характеристик при различных характерах нагрузки представлены на рис.2.2.6.

Зависимость коэффициента полезного действия от нагрузки в  $Tr$  определяет энергоэффективность работы, позволяет прогнозировать потери в  $Tr$  при изменении нагрузки, оптимизировать его работу в сетях электро-снабжения. При этом следует учитывать, что у трансформаторов очень высокий КПД, близкий к единице, и определять его с помощью непосредственного измерения мощностей  $P_2$  и  $P_1$  достаточно точно не удастся, т.к. погрешность измерений приборов соизмерима с разностью между измеряемыми величинами. ГОСТом рекомендуется определять кпд  $Tr$  косвенным методом, из опытов холостого хода и короткого замыкания.

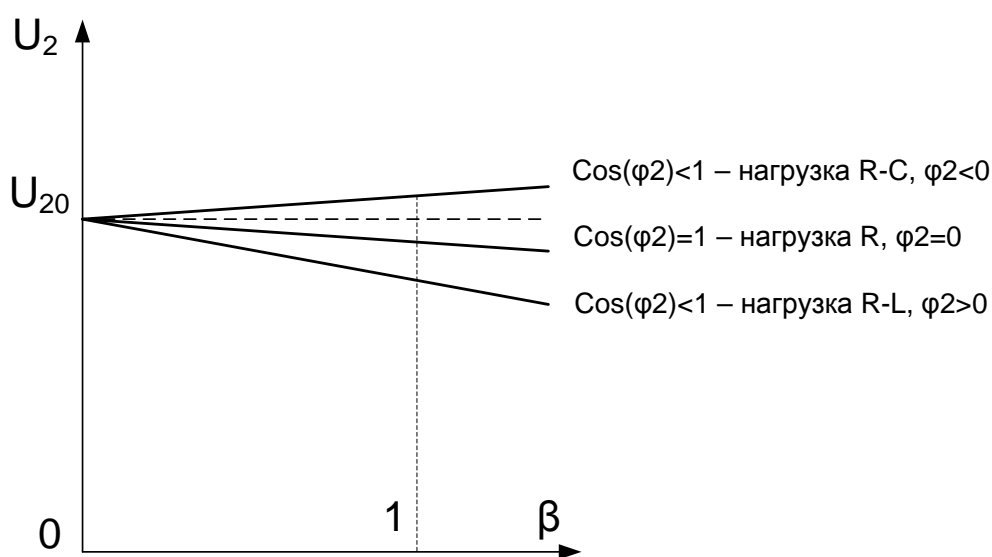


Рис.2.2.6. Внешние характеристики

При расчете КПД используется следующие выражения

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{\kappa}}{P_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\kappa}} ; \quad P_2 = \beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 .$$

Результатом расчетов является построение энергетических характеристик  $T_p$  - зависимости  $\eta = f(I_2)$  или  $\eta = f(\beta)$ . **Условия снятия характеристик – постоянство  $U_{ном}, f_1, \cos(\varphi_2)$ .**

Семейство КПД от нагрузки при различных характерах нагрузки представлено на рис.2.2.7.

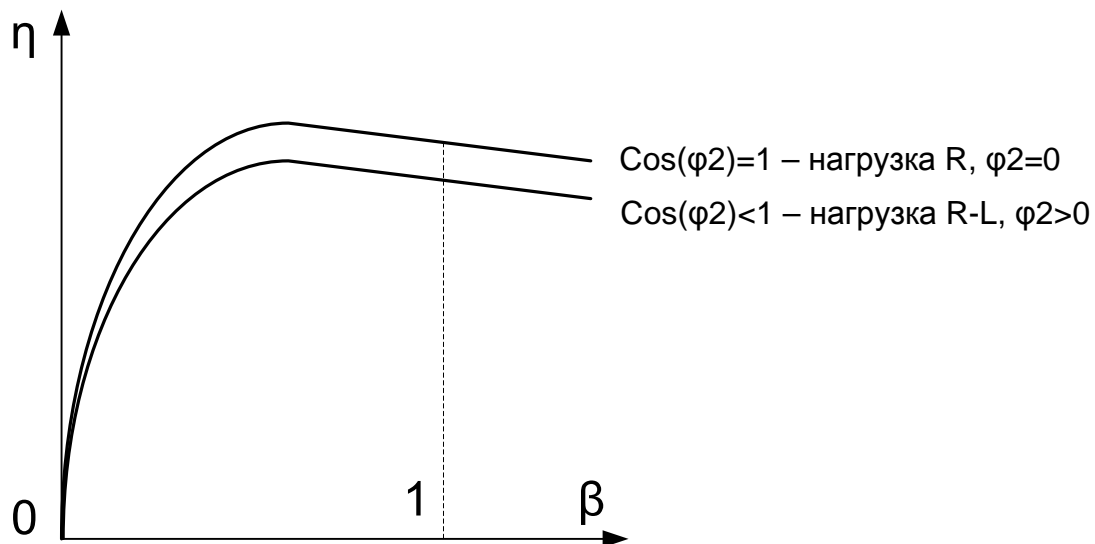


Рис.2.2.7. Зависимости КПД от нагрузки

Разработаны методики, позволяющие рассчитать параметры схемы замещения, используя паспортные данные трансформатора (табл. 2.1). Основная расшифровка номинальных данных приведена выше.

Для правильного использования каталожных данных  $T_p$  требуется определить относительные величины:

- относительное напряжение короткого замыкания при  $I_{ном}$  в процентах от  $U_{ном}$ ,

$$u_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% ;$$

- относительное значение тока ХХ в процентах от номинального тока первичной обмотки при номинальном напряжении

$$i_0 \% = \frac{I_{10}}{I_{1H}} \cdot 100\% ;$$

Ниже приведен пример расчета характеристик трансформатора.

### 2.2.2. Пример расчета характеристик трансформатора по номинальным данным

Тип трансформатора – ТДЦН – 400 000 / 110	
Номинальная мощность	$S_H = 400\,000\text{ кВА} = 400\text{ МВА}$
Номинальное напряжение первичной обмотки	$U_{1H} = 110\text{ кВ}$
Номинальное напряжение вторичной обмотки	$U_{2H} = 20\text{ кВ}$
Мощность холостого хода	$P_O = 320\text{ кВт}$
Мощность короткого замыкания	$P_K = 900\text{ кВт}$
Напряжение короткого замыкания	$u_K = 10,5\%$
Ток холостого хода	$i_O\% = 0,45\%$
Схема соединения обмоток	Y/Y
Группа соединения обмоток	0

1) Характеристика трансформатора по условному обозначению.

Из условного обозначения следует, что это трехфазный трансформатор силовой общего назначения (Т), имеющий охлаждение с дутьем (Д) и принудительной циркуляцией масла (Ц), а также с устройством переключения регулировочных отводов под нагрузкой (с устройством РПН) (Н). Номинальная мощность трансформатора 400 МВА, номинальное напряжение первичной обмотки 110 кВ.

2) Расчет параметров трансформатора по номинальным данным.

2.1) Коэффициент трансформации трансформатора определяется в режиме холостого хода при номинальном напряжении первичной обмотки:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{110}{20} = 5,5.$$

2.2) Фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе.

В паспортных данных указываются линейные напряжения. С учетом того, что схема соединения обмоток трансформатора Y/Y, то фазные напряжения меньше линейных в  $\sqrt{3}$ . Соответственно, при соединении «треугольник»,  $\Delta$  фазные и линейные напряжения по величине равны.

Следовательно, в соответствии с заданием, фазное напряжение первичной обмотки:

$$U_{\phi 1} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5 \text{ кВ} ,$$

фазное напряжение вторичной обмотки:

$$U_{\phi 2} = \frac{U_{2H}}{\sqrt{3}} = \frac{20}{\sqrt{3}} = 11,5 \text{ кВ} .$$

2.3) Номинальные линейные и фазные токи в обмотках трансформатора.

С учетом того, что для трехфазного трансформатора независимо от схемы соединения обмоток

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_{2H} \cdot I_{2H} ,$$

то номинальный линейный ток в первичной обмотке равен:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{4000000000}{\sqrt{3} \cdot 110000} = 2100 \text{ А} = 2,1 \text{ кА} ,$$

а номинальный линейный ток во вторичной обмотке:

$$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}} = \frac{4000000000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 11550 \text{ А} = 11,55 \text{ кА} .$$

Так как, по заданию, схема соединения обмоток Y/Y, то линейные токи равны фазным токам. Соответственно, при соединении «треугольник»,  $\Delta$  фазные токи меньше линейных токов в  $\sqrt{3}$ .

2.4) Ток первичной обмотки в режиме холостого хода, выраженный в амперах:

$$I_{10} = i_0 \% \cdot \frac{I_{1H}}{100} = 0,45 \cdot \frac{2100}{100} = 9,45 \text{ А} ,$$

так как

$$i_0 \% = \frac{I_{10}}{I_{1H}} \cdot 100\% = 0,45\%.$$

2.5) Напряжение короткого замыкания, выраженное в вольтах:

$$U_{1K} = u_K \% \cdot \frac{U_{1H}}{100} = 10,5 \cdot \frac{110}{100} = 11,55 \text{ кВ},$$

так как

$$u_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% = 10,5\%.$$

2.6) Коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{10}} = \frac{320000}{\sqrt{3} \cdot 110000 \cdot 9,45} = 0,18.$$

2.7) Параметры однофазной схемы замещения трансформатора при холостом ходе.

Для трехфазных трансформаторов в номинальных данных указывается мощность потерь холостого хода  $P_0$  и короткого замыкания  $P_K$  на три фазы. При расчете параметров однофазной схемы замещения эти мощности будут в три раза меньше. Полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода для одной фазы рассчитаем по формулам:

$$Z_0 = Z_1 + Z_m = \frac{U_{1\Phi}}{I_{10}} = \frac{63500}{9,45} = 6720 \text{ Ом} = 6,72 \text{ кОм};$$

$$r_0 = r_1 + r_m = \frac{P_0}{3 \cdot I_{10}^2} = \frac{320000}{3 \cdot 9,45^2} = 1194 \text{ Ом} = 1,2 \text{ кОм};$$

$$X_0 = X_1 + X_m = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{6,72^2 - 1,2^2} = 6,61 \text{ кОм},$$

где  $Z_1$ ,  $r_1$ ,  $X_1$  – полное, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки;

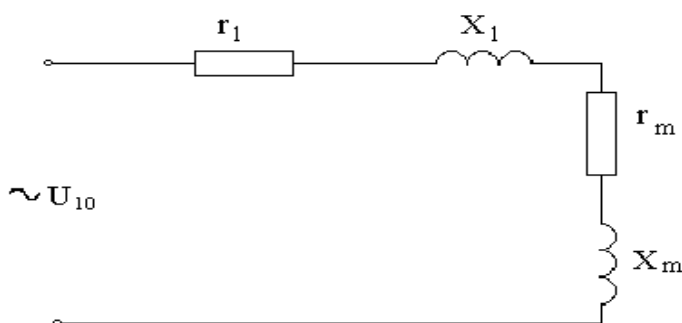
$Z_m$ ,  $r_m$ ,  $X_m$  – полное, активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура.

В силовых трансформаторах сопротивления первичной обмотки в десятки и сотни раз меньше сопротивления намагничивающего контура, поэтому с достаточной точностью можно считать, что сопротивления намагничивающего контура равны сопротивлениям холостого хода:

$$Z_m \approx Z_0 = 6,72 \text{ кОм};$$

$$r_m \approx r_0 = 1,2 \text{ кОм};$$

$$X_m \approx X_0 = 6,61 \text{ кОм}.$$



#### 2.8) Потери в стали трансформатора.

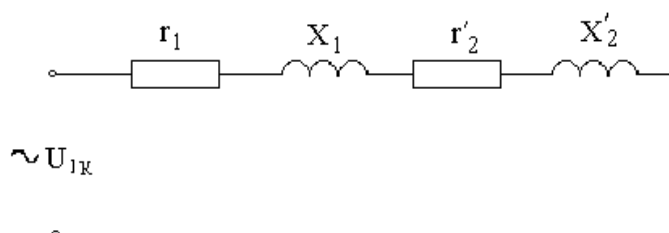
Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током, то электрическими потерями в первичной обмотке пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором из сети, расходуется на компенсацию потерь в стали, т.е.

$$P_{cm} = P_0 = 320 \text{ кВт}.$$

#### 2.9) Коэффициент мощности трансформатора при коротком замыкании:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_{1K} \cdot I_{1H}} = \frac{900000}{\sqrt{3} \cdot 11550 \cdot 2100} = 0,02.$$

#### 2.10) Параметры однофазной схемы замещения трансформатора при коротком замыкании.



Полное, активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания трансформатора можно определить по формулам:

$$Z_0 = Z_1 + Z_2' = \frac{U_{IK}}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}} = \frac{11550}{\sqrt{3} \cdot 2100} = 3,18 \text{ Ом};$$

$$r_K = r_1 + r_2' = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}^2} = \frac{900000}{\sqrt{3} \cdot 2100^2} = 0,68 \text{ Ом};$$

$$X_K = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{3,18^2 - 0,068^2} = 3,18 \text{ Ом}.$$

Так как в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и приведенной вторичной обмотками, то полное, активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки и соответствующие им сопротивления вторичной обмотки, приведенной к первичной равны:

$$Z_1 \approx Z_2' = \frac{Z_K}{2} = \frac{3,18}{2} = 1,59 \text{ Ом};$$

$$r_1 \approx r_2' = \frac{r_K}{2} = \frac{0,068}{2} = 0,034 \text{ Ом};$$

$$X_1 \approx X_2' = \frac{X_K}{2} = \frac{3,18}{2} = 1,59 \text{ Ом}.$$

Истинные сопротивления вторичной обмотки

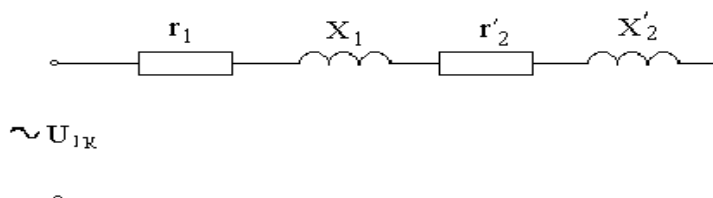
$$Z_2 = \frac{Z_2'}{k^2} = \frac{1,59}{5,5^2} = 0,053 \text{ Ом};$$

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} = \frac{0,034}{5,5^2} = 0,001 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{1,59}{5,5^2} = 0,053 \text{ Ом}.$$

2.11) Однофазная схема замещения трансформатора под нагрузкой представлена на рис. На этой схеме  $Z'_{HF}$  – это полное сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке.





2.12) Электрические потери в обмотках трансформатора в номинальном режиме.

Так как ЭДС, индуцируемая в первичной обмотке трансформатора  $E_1$  составляет при коротком замыкании примерно  $0,5U_1 \approx (3-7)\%$  от  $U_{1H}$ , то потери в стали трансформатора в опыте короткого замыкания имеют ничтожную величину. Таким образом, мощность, потребляемая трансформатором в режиме короткого замыкания, равна электрическим потерям в его обмотках:

$$P_K = p_{\text{эл1}} + p_{\text{эл2}} = 900 \text{ кВт}.$$

### 3) Построение внешних характеристик трансформатора.

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки  $U_2$  от тока этой обмотки  $I_2$  при условии, что  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  и  $U_1 = \text{const}$ .

Вторичное напряжение трансформатора при нагрузке

$$U_2 = U_{20} - U_{20} \cdot \frac{\Delta U \%}{100},$$

где  $U_{20}$  – напряжение на вторичной обмотке при номинальном напряжении на первичной обмотке в режиме холостого хода. В рассматриваемом примере  $U_{20} = U_{2H} = 20 \text{ кВ}$ .

$$\Delta U \% = \beta \cdot (u_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + u_{Kp} \cdot \sin \varphi_2),$$

где  $\Delta U\%$  - процентное изменение напряжение трансформатора при нагрузке;

$\beta = I_2 / I_{2H}$  - коэффициент загрузки трансформатора;

$I_2$  – ток во вторичной обмотке (ток нагрузки);

$I_{2H}$  – номинальный ток вторичной обмотки.

Определим составляющие напряжения короткого замыкания:

активная составляющая

$$u_{Ka} = \frac{I_{1H} \cdot r_K}{U_{1\phi}} \cdot 100\% = \frac{2100 \cdot 0,068}{63500} \cdot 100\% = 0,2\%$$

реактивная составляющая

$$u_{Kp} = \frac{I_{1H} \cdot X_K}{U_{1\phi}} \cdot 100\% = \frac{2100 \cdot 3,18}{63500} \cdot 100\% = 10,5\%$$

Необходимо рассчитать и построить внешние характеристики при  $\cos \varphi_2 = 1$  и при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  для  $\beta = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$ . Данные расчета свести в табл. 1.

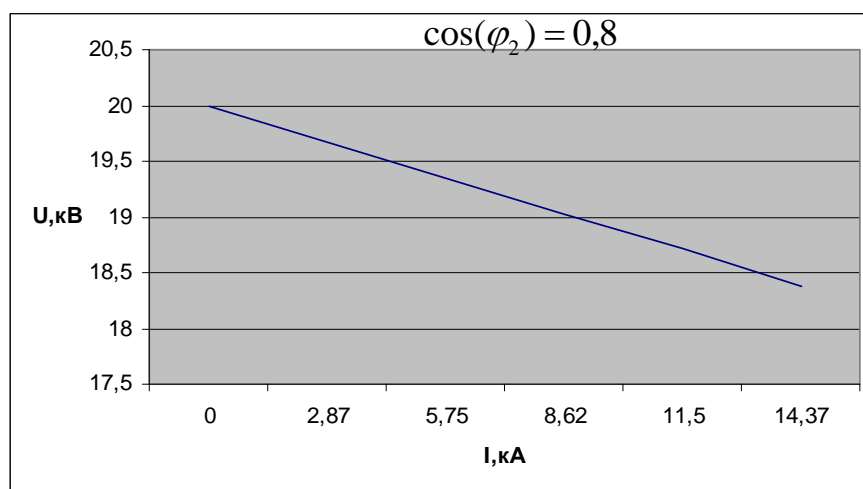
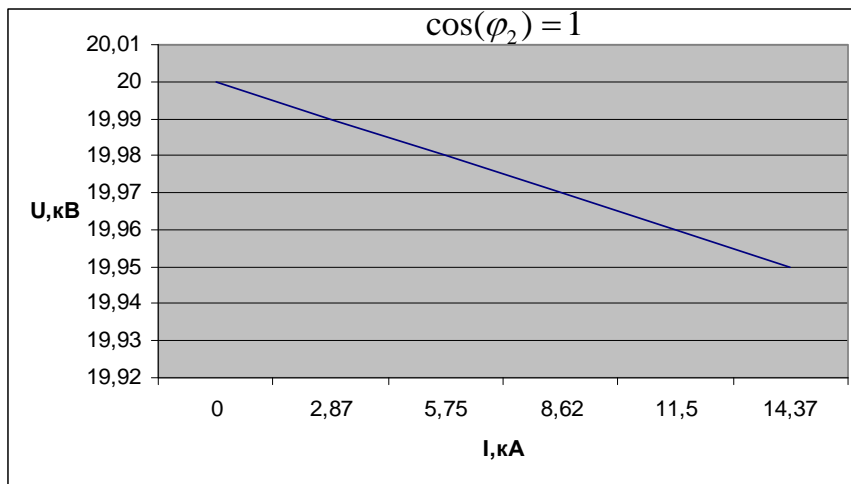
Пример для  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и  $\beta = 1$ :

$$\Delta U\% = \beta \cdot (u_{Ka} \cdot \cos \varphi_2 + u_{Kp} \cdot \sin \varphi_2) = 1 \cdot (0,2 \cdot 0,8 + 10,5 \cdot 0,6) = 6,46\%$$

$$U_2 = U_{20} - U_{20} \cdot \frac{\Delta U\%}{100} = 20 - 20 \cdot \frac{6,46}{100} = 18,71 \text{ kV}$$

### Результаты расчета внешних характеристик трансформатора

	$\beta$	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$\cos \varphi_2 = 1$	$I_2, \text{ kA}$	0	2,87	5,75	8,62	11,5	14,37
	$U_2, \text{ kV}$	20	19,99	19,98	19,97	19,96	19,95
$\cos \varphi_2 = 0,8$	$I_2, \text{ kA}$	0	2,87	5,75	8,62	11,5	14,37
	$U_2, \text{ kV}$	20	19,67	19,35	19,03	18,71	18,38



#### 4) Построение зависимости КПД трансформатора от его загрузки

Коэффициент полезного действия трансформатора рассчитывается по соотношению

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K}.$$

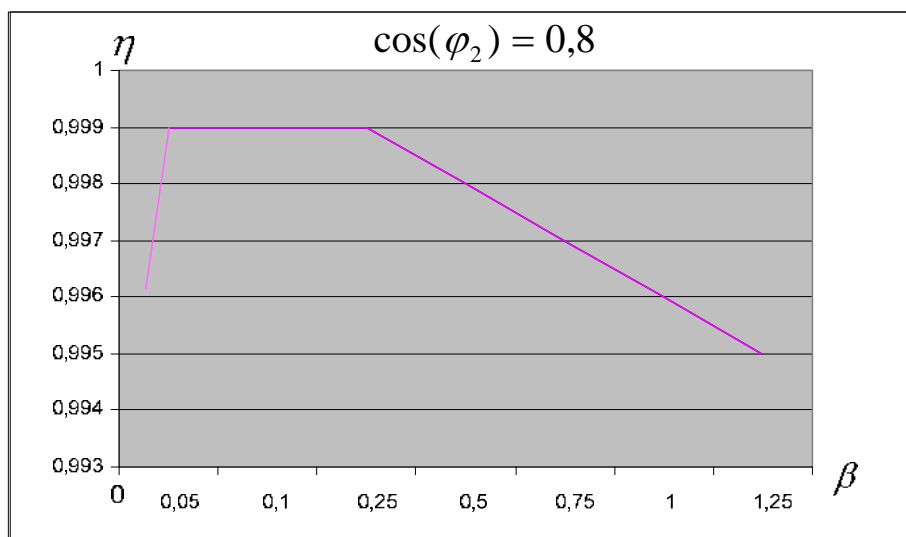
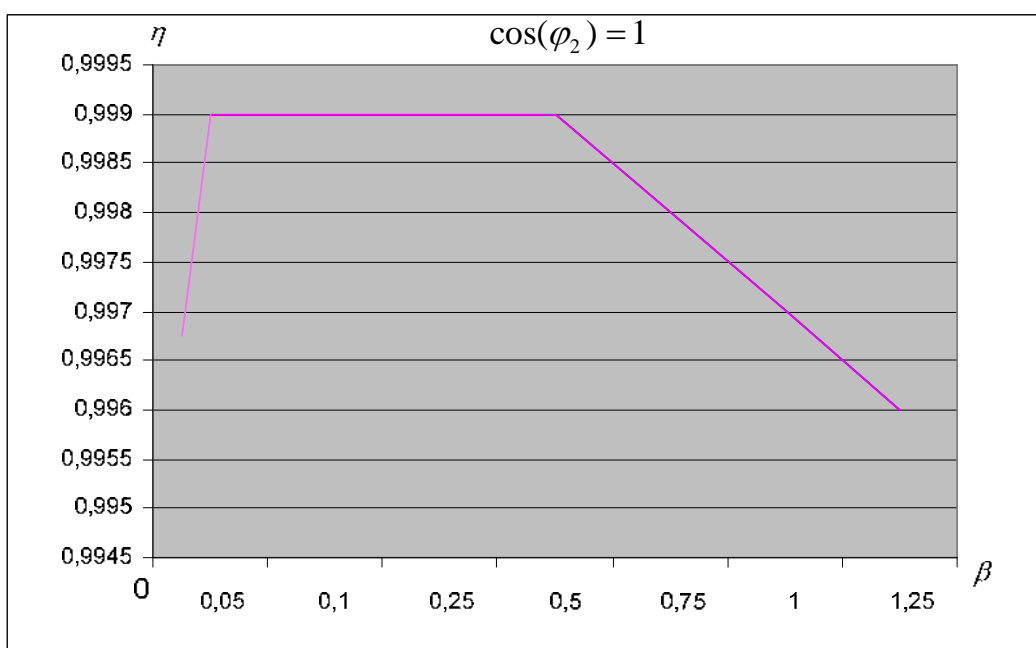
Необходимо рассчитать  $\eta$  при  $\cos \varphi_2 = 1$  и при  $\cos \varphi_2 = 0.8$  для  $\beta = 0; 0.05; 0.1; 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25$ . Данные расчета свести в табл. 2 и построить зависимость  $\eta = f(I_2)$ .

Пример для  $\cos \varphi_2 = 0.8$  и  $\beta = 1$ :

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K} = 1 - \frac{320 + 1^2 \cdot 900}{1 \cdot 400000 \cdot 0.8 + 320 + 1^2 \cdot 900} = 0.996$$

## Результаты расчета зависимости КПД трансформатора от тока нагрузки

$\cos \varphi_2 = 1$	$\beta$	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25
	$I_2, \text{кА}$	0	0,575	1,15	2,87	5,75	8,62	11,5	14,37
	$\eta$	0	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998	0,997	0,996
$\cos \varphi_2 = 0,8$	$I_2, \text{кА}$	0	0,575	1,15	2,87	5,75	8,62	11,5	14,37
	$\eta$	0	0,999	0,999	0,999	0,998	0,997	0,996	0,995



### 2.2.3. Задание для расчета характеристик трансформатора по номинальным данным

Для выполнения задания по расчету характеристик  $Tr$  требуется выполнить следующие расчеты и графические построения:

1. Дать характеристику трансформатора по условному обозначению.
2. Рассчитать по номинальным данным:
  - коэффициент трансформации трансформатора;
  - фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе;
  - номинальные линейные и фазные токи в обмотках трансформатора;
  - ток первичной обмотки в режиме холостого хода,  $A$ ;
  - напряжение короткого замыкания,  $B$ ;
  - коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе;
  - параметры однофазной схемы замещения трансформатора при холостом ходе;
  - потери в стали трансформатора;
  - коэффициент мощности трансформатора при опыте короткого замыкания;
  - параметры однофазной схемы замещения трансформатора при коротком замыкании;
  - параметры однофазной схемы замещения трансформатора под нагрузкой;
  - электрические потери в обмотках трансформатора в номинальном режиме.
3. Построить внешние характеристики трансформатора при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  для  $\beta = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$ .
4. Построить зависимости КПД трансформатора от его загрузки при  $\cos \varphi_2 = 1$  и при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  для  $\beta = 0; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25$ .

Данные для расчета характеристик  $Tr$  приведены в таблице 2.

## Данные для расчета характеристик трансформатора

№ п/п	Тип трансформатора	Потери, кВт		$u_K$ %	$i_0$ %	$U_{2H}$ кВ	Схемы соедин. обмоток	Группа транс- фор- матора
		$P_0$	$P_K$					
1	ТМ-25/10	0,13	0,6	4,5	3,2	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
2	ТМН-6300/35	7,6	46,5	7,5	0,8	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
3	ТДНС-63000/35	50	250	12,7	0,45	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
4	ТМ-100/10	0,33	1,97	4,5	2,6	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
5	ТДНС-10000/35	12	60	8,0	0,75	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
6	ТМ-40/10	0,175	0,88	4,5	3,0	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
7	ТМ-160/10	0,51	2,65	4,5	2,4	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
8	ТМ-630/10	1,31	8,5	5,5	2,0	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
9	ТМ-250/10	0,74	4,2	4,5	2,3	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
10	ТМ-400/10	0,95	5,9	4,5	2,1	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
11	ТДНС-40000/35	36	170	12,7	0,5	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
12	ТМН-4000/35	5,6	33,5	7,5	0,9	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
13	ТМ-160/10	0,51	2,65	4,5	2,4	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
14	ТМ-40/10	0,175	0,88	4,5	3,0	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
15	ТМН-6300/35	7,6	46,5	7,5	0,8	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
16	ТМ-25/10	0,13	0,6	4,5	3,2	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
17	ТДНС-63000/35	50	250	12,7	0,45	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
18	ТДНС-10000/35	12	60	8,0	0,75	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
19	ТМ-100/10	0,33	1,97	4,5	2,6	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
20	ТМ-630/10	1,31	8,5	5,5	2,0	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
21	ТМ-250/10	0,74	4,2	4,5	2,3	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
22	ТМ-400/10	0,95	5,9	4,5	2,1	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
23	ТДНС-40000/35	36	170	12,7	0,5	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
24	ТМН-4000/35	5,6	33,5	7,5	0,9	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
25	ТМН-2500/35	3,9	23,5	6,5	1,0	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
26	ТМН-2500/35	3,9	23,5	6,5	1,0	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
27	ТМН-1600/35	2,75	16,5	6,5	1,3	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
28	ТМН-1600/35	2,75	16,5	6,5	1,3	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11
29	ТМН-1000/35	2,1	11,6	6,5	1,4	0,4	Y/Y <sub>H</sub>	0
30	ТМН-1000/35	2,1	11,6	6,5	1,4	0,69	Δ/Y <sub>H</sub>	11

### 2.3. Способы определения номера группы соединений обмоток трансформатора

#### 2.3.1. Общие сведения

Система часовых обозначений схем соединений трансформаторов получила широкое распространение и рекомендуется Международной электротех-

нической комиссией (МЭК) для повсеместного применения в качестве одной из основных характеристик силовых трансформаторов. Связано это, прежде всего, с возможностью включения нескольких трансформаторов на общую нагрузку, т.е. обеспечение нормальной параллельной работы трансформаторов.

Для большинства энергетических объектов это актуально, т.к. при значительной мощности потребителя целесообразно иметь не один, а несколько параллельно включенных трансформаторов меньшей мощности. Это позволяет улучшить качество и надежность электроснабжения потребителей: отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки, осуществлять планово-ревизионный ремонт трансформаторов и т.п.

Одним из условий параллельного включения трансформаторов является их соединение между собой равнопотенциальными зажимами. Для этого необходимо знать угол сдвига  $\alpha$ , между первичным и вторичным линейными напряжениями, измеренными на одноименных зажимах.

В соответствии с величиной угла определяется группа, к которой принадлежит трансформатор. В свою очередь, угол  $\alpha$  зависит от:

- направления, в котором намотана обмотка;
- способа обозначения зажимов, их маркировки;
- схемы соединения обмоток трансформатора.

Группа соединений обозначается целыми числами от 0 до 11, т.е. всего групп 12. При этом трансформаторы, работающие параллельно на общую нагрузку, должны иметь одну группу соединения.

Невыполнение условия приводит к возникновению уравнивающих токов при работе трансформаторов на холостом ходе. Таким образом, правильное определение группы соединения трансформатора позволит ему безаварийно и надежно работать в системах электроснабжения промышленных и гражданских объектов.

### **2.3.2. Способы определения группы соединения трансформатора**

Существуют различные способы определения угла сдвига между первичными и вторичными линейными напряжениями. В зависимости от того, строятся ли векторные диаграммы для определения номера группы соединений или нет, способы можно разделить:

- на теоретические, в основе которых лежит построение и сравнение векторных диаграмм линейных и фазных напряжений обмоток высокого и низкого напряжения;

- на экспериментальные, в которых используются инструментальные измерения, по результатам которых непосредственно определяется группа соединений;

- на комбинированные, с применением необходимых для построения векторных диаграмм практических измерений.

Применение того или иного способа определения группы зависит от объекта исследования – при проектировании трансформатора и исследовании схем соединения его обмоток целесообразно применять теоретический способ, при работе с реальным трансформатором возможно использовать результаты экспериментальных измерений.

Сущность комбинированного метода позволяет применять его в том и другом случаях.

### **2.3.3. Схемы соединения обмоток трансформатора и их векторные диаграммы**

В основе теории групп соединения лежат векторные диаграммы трансформатора при холостом ходе, построенные по системе векторных обозначений.

Рассмотрение схем соединения и векторных диаграмм обмоток требует правильного буквенного обозначения их элементов. Общеприняты следующие обозначения:

- начало обмоток высшего напряжения (ВН) обозначается заглавными буквами  $A, B, C$ , концы – буквами  $X, Y, Z$ ;

- начало обмоток низшего напряжения (НН) обозначается строчными буквами  $a, b, c$ , концы – буквами  $x, y, z$ ;

- вывод нулевой точки -  $O$  (для ВН) и  $o$  (для НН).

Первичные и вторичные обмотки трехфазных трансформаторов соединяют по следующим основным схемам:

- схема «звезда», обозначается буквой  $Y$  или латинской  $Y$ , «звезда с выведенной нулевой точкой»  $Y_o$ ;

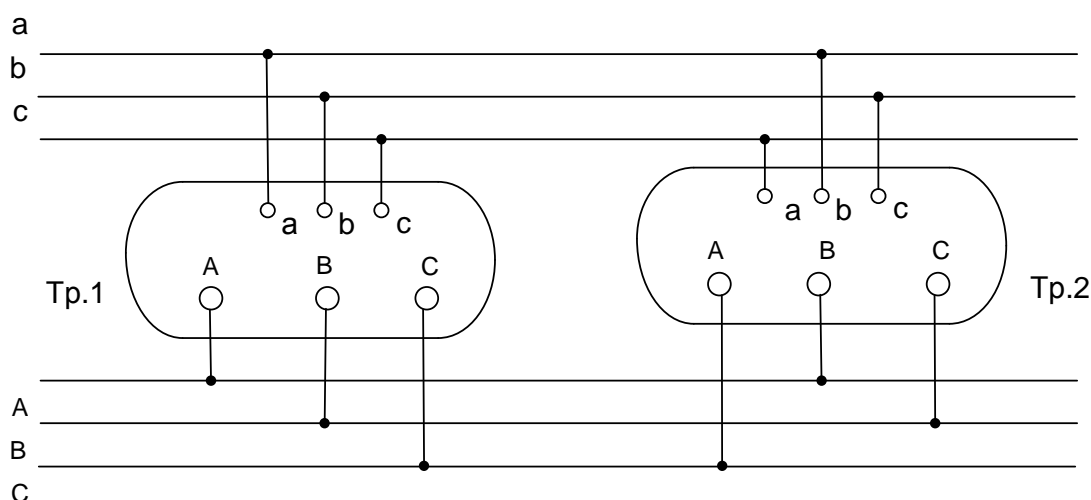
- схема «треугольник», обозначается буквой  $\Delta$  или знаком  $\Delta$ ;

- схема «зигзаг», обозначается латинской буквой  $Z$ , «зигзаг с выведенной нулевой точкой»  $Z_o$ .

Следует отметить, что схема «зигзаг» применяется только в обмотках низкого напряжения.



На рисунке 2.3.1 представлено изображение зажимов на крышке трансформатора. При этом стандартным считается присоединение фаз сети к зажимам трансформатора 1, т.е. если смотреть на зажимы со стороны ВН, то порядок буквенного обозначения слева на право  $ABC$ ,  $abc$ . Для примера, у трансформатора 2 выполнено нестандартное присоединение фаз сети к его зажимам –  $BCA$ ,  $bca$ .



**Рис. 2.3.1. Пример подключения обмоток трансформатора**

Рассмотрим схемы соединения обмоток и их векторные диаграммы. Для упрощения графического исполнения схем обмоток и векторных диаграмм целесообразно ввести следующие условности:

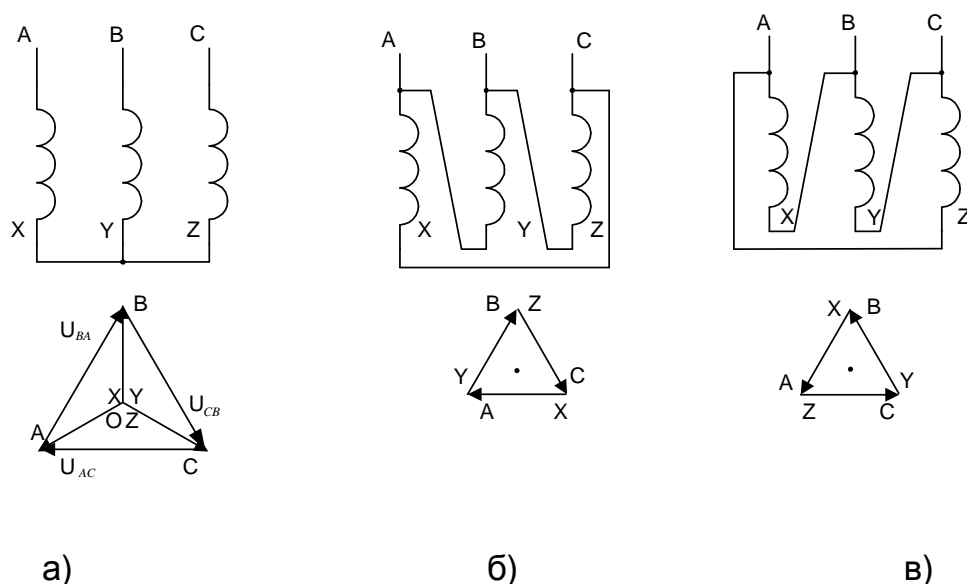
а) в независимости от типа катушек, числа витков, слоев и т.п. все обмотки обозначаются простыми дужками;

б) направление намотки катушек ВН и НН на стержне могут либо совпадать, либо быть намотаны в противоположные стороны. В соответствии с этим, в верхней части схемы соединения будут располагаться буквенные обозначения либо начала обмоток, либо их конца;

в) только одно чередование фаз обмоток считается стандартным –  $ABC$ , все остальные способы подключения являются нестандартными;

г) считается, что векторная диаграмма линейных и фазных напряжений для сети ВН является неизменной и относительно этой схемы рассматривается диаграмма НН, которая зависит от направления намотки катушек и их фазировки.

На рисунке 2.3.2 представлены схемы соединения обмоток ВН и их векторные диаграммы.

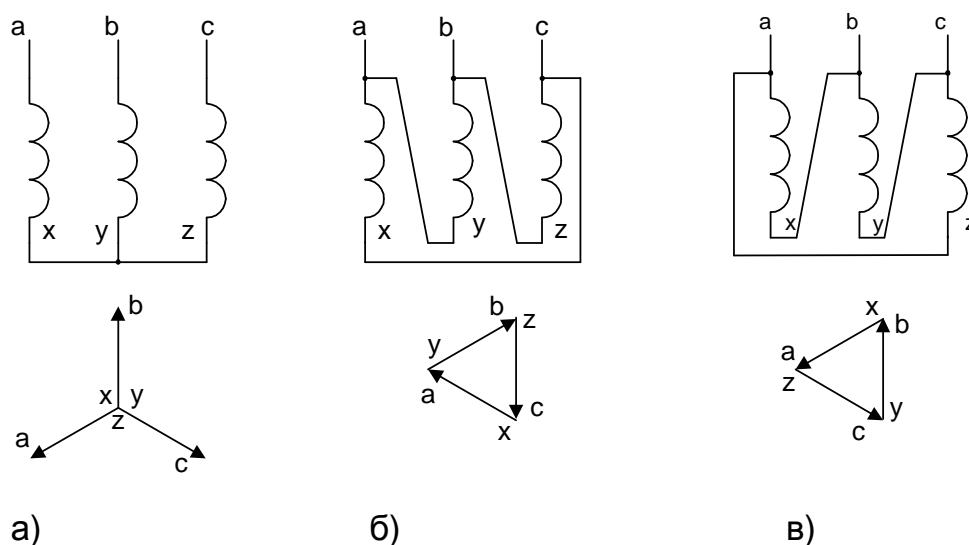


**Рис. 2.3.2. Схемы соединения обмоток ВН**

Соответственно на рис.2.3.2а – для схемы соединения  $Y$ , на рис. 2.3.2б и 2.3.2в – для двух типов соединения  $\Delta$ .

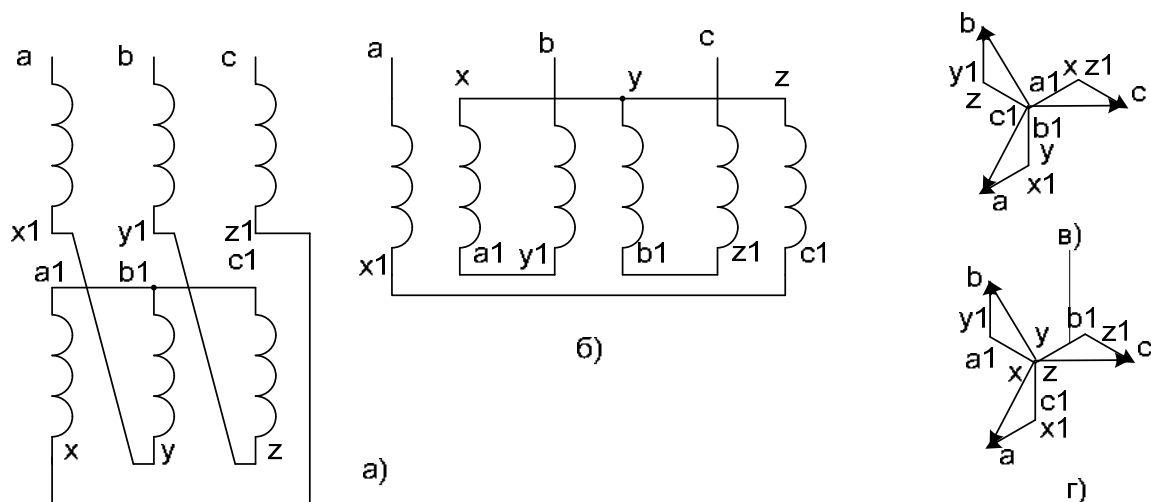
На рисунке 2.3.3 представлены схемы соединения обмоток НН и их векторные диаграммы. Соответственно на рис.2.3.3а – для схемы соединения  $Y$ , на рис. 2.3.3б и 2.3.3в – для двух типов соединения  $\Delta$ .

Отдельно рассмотрим схемы соединения  $Z$ , одна из которых является классической (рис. 2.3.4а) – на ней отдельные ветви катушек размещены по высоте стержня друг под другом, и фактическая (рис. 2.3.4.б) – выполнена в соответствии с обычным монтажным исполнением, когда обе ветви зигзага имеют одинаковое направление намотки и расположены по всей высоте стержня. На рисунке 2.3.4в и 2.3.4г соответственно представлены векторные диаграммы для двух схем  $Z$ .



**Рис. 2.3.3. Схемы соединения обмоток НН**

Сущностью способа соединения  $Z$  является то, что каждую фазную обмотку со стороны НН делят на две части и размещают на разных стержнях. Обе части соединяются таким образом, чтобы их ЭДС геометрически вычитались, т.е. конец одной фазной половины соединяют с концом другой полуфазы.



**Рис.2.3.4. Схемы соединения  $Z$  обмоток НН**

Рассмотренные схемы соединения обмоток и их векторные диаграммы являются основой при определении групп соединения трансформаторов. Сравнение векторных диаграмм ВН и НН позволяет получить необходимые численные сведения и определить угол  $\alpha$ , по значению которого вычисляется номер группы, к которой принадлежит исследуемый трансформатор.

#### **2.3.4. Определение группы соединений обмоток трансформаторов**

Способ определения группы соединения, как уже указывалось, зависит от целей исследования. При работе с реальными трансформаторами предпочтение отдается практическим методам определения группы. Существуют конкретные методики измерений, таблицы и диаграммы, по которым определяют номер группы трансформатора без построения его векторных диаграмм ВН и НН. Для анализа абстрактного объекта лучше подходят теоретические исследования, и в дальнейшем будем рассматривать только методы, основанные на расчетно-графическом методе определения угла  $\alpha$ .

Определим основные способы образования различных групп соединений трансформаторов:

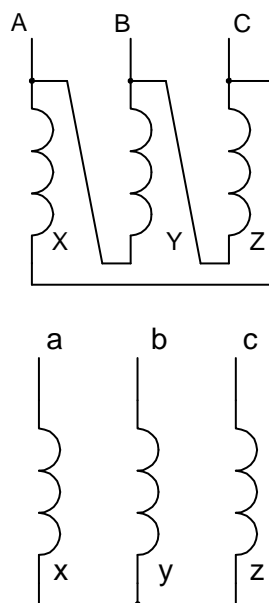
- изменение схемы соединения;
- изменения направления намотки катушек;
- перестановка обозначений фаз.

Известны два основных метода обработки векторных диаграмм, позволяющие получить номер группы трансформатора:

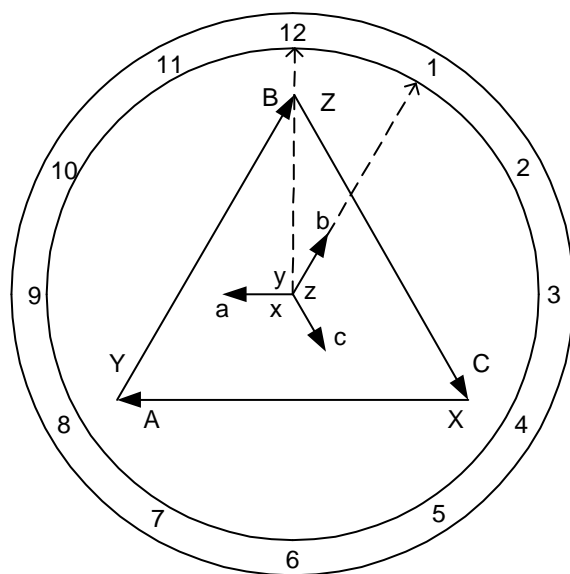
- определяют угол, на который вектор линейного напряжения обмотки НН отстает от вектора линейного напряжения обмотки ВН. Для определения номера группы этот угол следует разделить на  $30^0$ ;

- определение угла сдвига между системами векторов ВН и НН. Угол сдвига можно определить, совместив «центры тяжести» векторных диаграмм. Минутная стрелка проводится из центра тяжести системы ВН через вершину  $B$ , а часовая стрелка – через вершину  $b$ . Часовое обозначение группы определяется непосредственно.

Разберем оба способа на примере схемы соединения  $\Delta/Y$ . На рисунке 2.3.5 представлены электрические схемы соединений обмоток ВН и НН (рис. 2.3.5а).



а)



б)

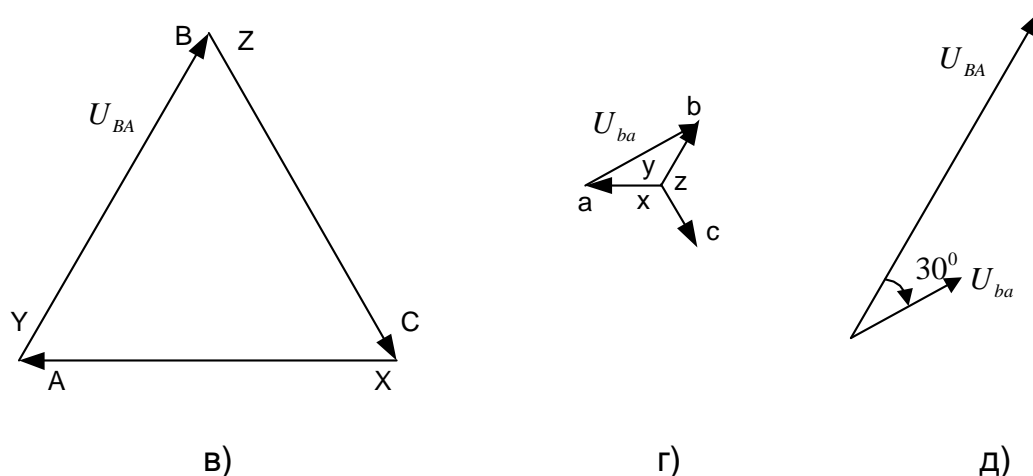


Рис.2.3.5. Определение группы соединения для схемы  $\Delta/Y - 1$

На рис. 2.3.5б представлен механизм определения группы соединений при совмещении центров тяжести диаграмм ВН и НН. Большая стрелка – через вершину  $B$ , стоит на 12. Малая стрелка – через одноименную вершину системы НН  $b$ , показывает на 1.

На рис. 2.3.5в, 2.3.5г изображены, соответственно, векторные диаграммы ВН и НН. Рисунок 2.3.5д показывает, каким образом определяется угол сдвига между линейными векторами ВН и НН, измеренными на одноименных зажимах. Вектор НН отстает от вектора ВН на  $\alpha = 30^\circ$ . Таким образом, оба способа определили группу трансформатора «1», т.е. полная запись обозначения трансформатора  $\Delta/Y - 1$ .

Для более полного понимания механизма построения векторных диаграмм и определения группы соединения трансформатора рассмотрим еще несколько примеров с разными схемами соединения обмоток.

Рассмотрим схему соединения обмоток  $Y/\Delta$ , представленную на рисунке 2.3.6а. Метод совмещения центров тяжести (рис. 2.3.6б) определил положение часовой стрелки на позиции 11. Определение угла сдвига между одноименными линейными напряжениями ВН и НН (рис. 2.3.6в, 2.3.6г, 2.3.6д) показало, что  $\alpha = 330^\circ$ , т.е. и в этом случае группа соединения трансформатора 11. Полная форма записи -  $Y/\Delta - 11$ .

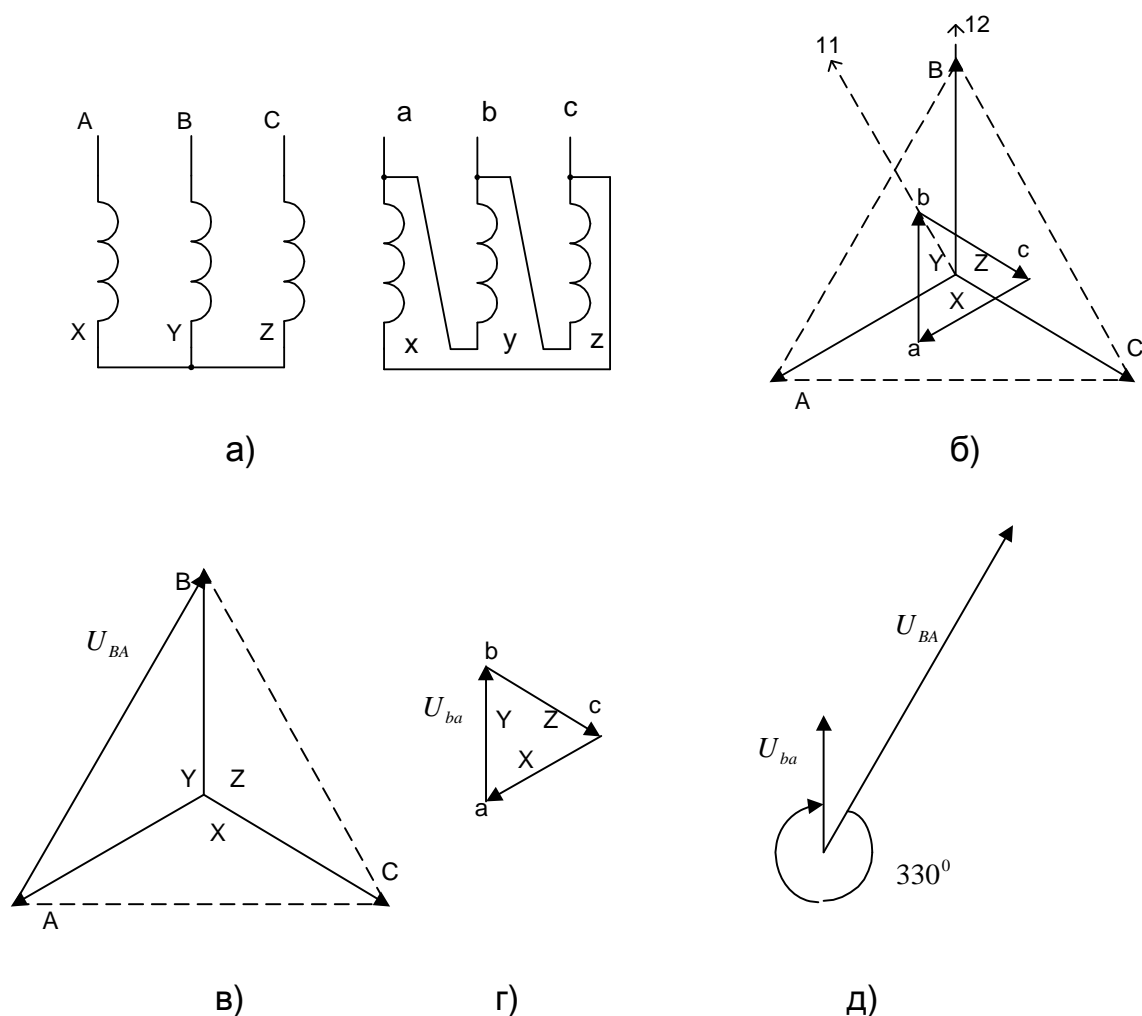
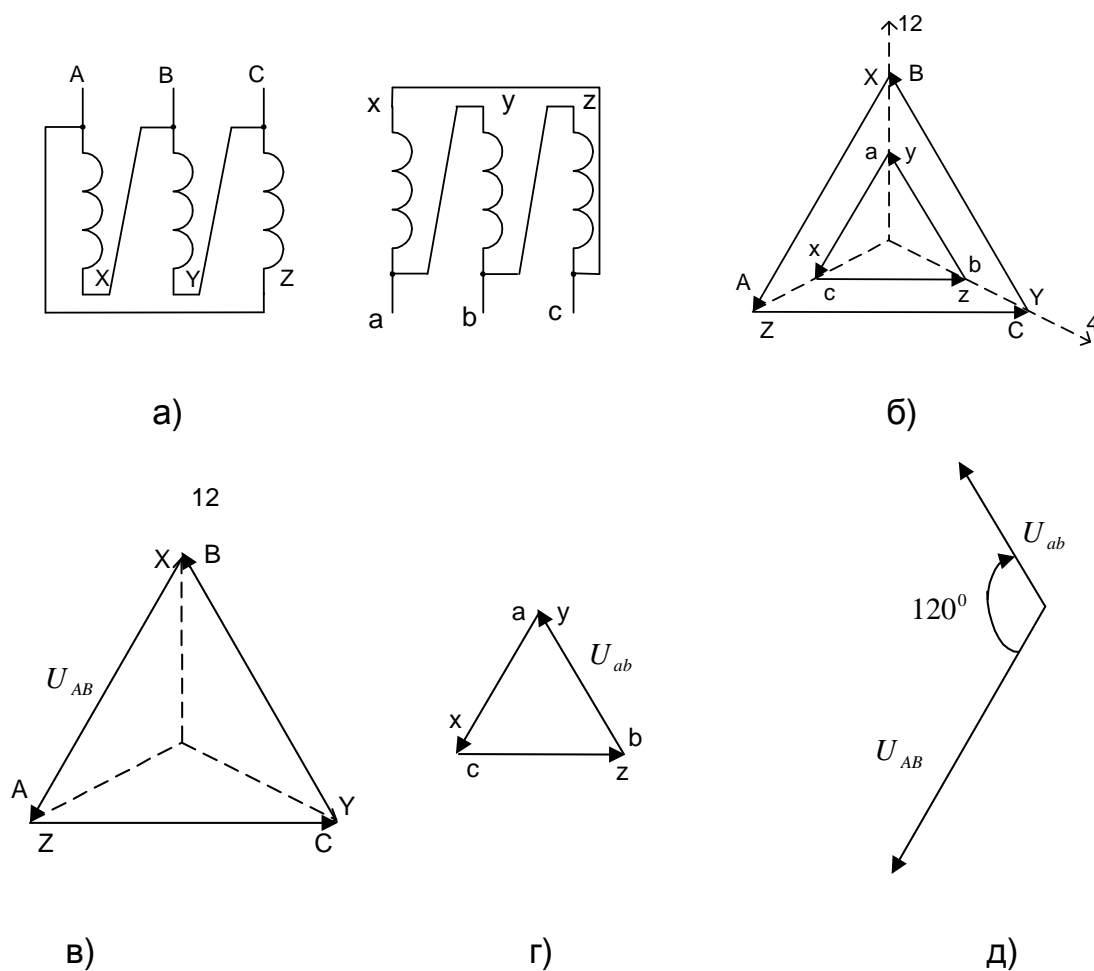


Рис.2.3.6. Определение группы соединения для схемы Y/Δ - 11

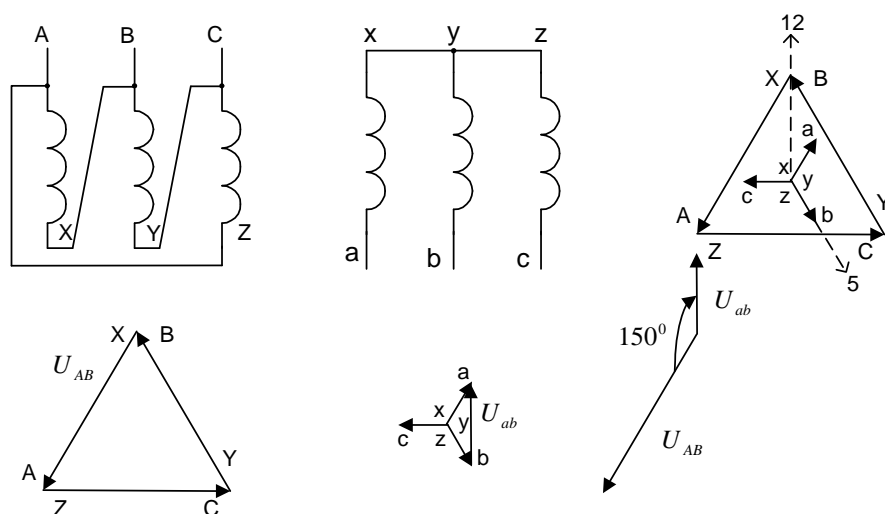
Анализ векторных диаграмм показал, что в случае одинаковых схем намотки обмоток ВН и НН ( $\Delta/\Delta$ ,  $Y/Y$ ) получаются четные номера групп соединения трансформаторов, а если схемы разные ( $\Delta/Y$ ,  $Y/\Delta$ ) – то нечетные.

Рассмотрим построение векторных диаграмм и алгоритм определения группы соединения для случая, когда одна из обмоток намотана в другую сторону. На рисунке 2.3.7 представлены схема и векторные диаграммы для схемы  $\Delta/\Delta$  (обмотка НН намотана в противоположную сторону).



**Рис.2.3.7. Определение группы соединения для схемы  $\Delta/\Delta$  - 4**

Для лучшего понимания построения векторных диаграмм при разном направлении намотки обмоток ВН и НН рассмотрим схему соединения  $\Delta/Y$  (рис. 2.3.8).



**Рис.2.3.8. Определение группы соединения для схемы  $\Delta/Y$  - 5**

Построения определили номер группы и полная запись обозначения трансформатора -  $\Delta/Y - 5$ .

Все вышерассмотренные способы получения разных групп соединения обмоток трансформатора производились с помощью изменения сочетания схем соединения обмоток ВН и НН, а так же изменением направления намотки катушек. Таким образом, можно получить все номера групп трансформатора, кроме 3 и 9.

Рассмотрим еще один способ получения разных групп соединения - перестановкой обозначений фаз. В этом случае группы 12, 6, 11 и 5 считаются основными и из них можно получать ряд производных групп.

Например, из 12 группы ( $Y/Y$ ) перемещением зажимов можно получить 4 и 8 группы, а если изменить направление намотки обмотки НН (6 группа) – то при перестановке фаз имеем 10 и 2 группы.

Аналогично, при соединении  $Y/\Delta$  (11 и 5 группы) можно получить при перемещении зажимов все нечетные группы соединений – 3, 7, 1, 9.

Поясним суть способа на примере построения соответствующих векторных диаграмм. За основу примем соединение  $Y/Y - 12$  и осуществим построения 4 и 8 групп соединения. Все необходимые построения представлены на рисунке 2.3.9.

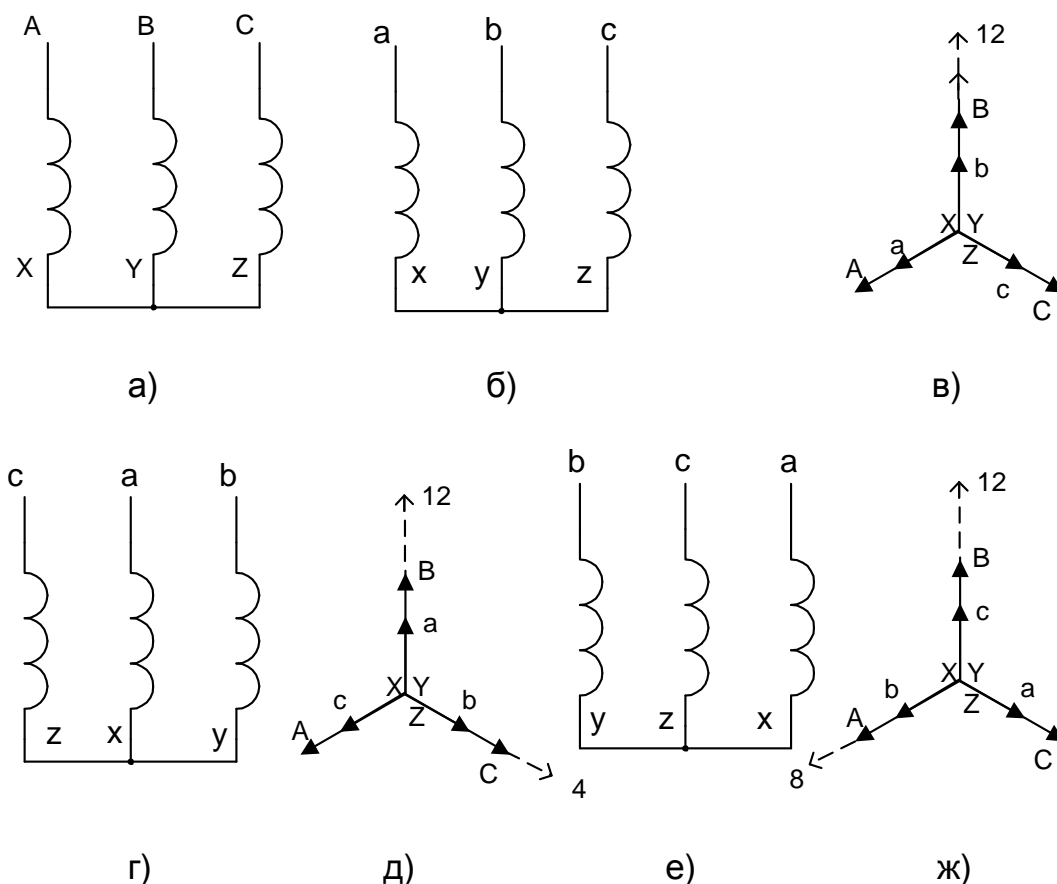


Рис.2.3.9. Определение группы соединения для схемы  $Y/Y - 12, 4, 8$



Схема соединения обмотки ВН остается неизменной (рис. 2.3.9а) На рис. 2.3.9б и 2.3.9в рассмотрено нормальное присоединение фаз обмотки НН, что соответствует 12 группе.

Далее изображены два случая, когда зажимы вторичной обмотки перемещены относительно первичной. При этом номер группы перемещался на 4, что соответствует углу поворота системы НН на  $120^0$ . последовательно определены две группы соединений трансформатора: 4, рис. 2.3.9 г, д; 8, рис. 2.3.9 е, ж.

Таким образом, используя способы получения разных групп соединений и методы определения номера группы можно получить все возможные группы соединений трехфазных трансформаторов.

Рассмотрение схем обмоток, содержащих соединение Z, требует отдельного рассмотрения. Следует отметить, что способы определения номера группы остаются такими же, как и при рассмотрении остальных схем соединения обмоток трансформатора.

### 2.3.5. Задания для определения группы соединений трансформаторов

В таблицах 2.3, 2.4 и 2.5 приведены варианты для определения групп соединений трансформаторов различными способами.

Построить векторные диаграммы и определить номер группы трансформатора двумя вышерассмотренными теоретическими способами. Следует произвести построения для разных способов получения групп соединения:

- а) различных схем соединения обмоток ВН и НН, таблица 2.3;
- б) при изменении направления намотки обмотки НН, таблица 2.4;
- в) с помощью перестановки обозначения фаз, таблица 2.5.

Таблица 2.3

#### Схемы соединения обмоток

№ вар	№ рисунка	
	ВН	НН
1	2а	3а

Таблица 2.4

#### Изменение направления намотки

№ вар	№ рисунка	
	ВН	НН
1	2в	3б

Продолжение таблицы 2.3

№ вар	№ рисунка	
	ВН	НН
2	2в	3в
3	2б	3б
4	2а	3в
5	2б	3а
6	2б	3в
7	2в	3б
8	2а	3б
9	2в	3а

Продолжение таблицы 2.4

№ вар	№ рисунка	
	ВН	НН
2	2а	3б
3	2в	3а
4	2а	3а
5	2в	3в
6	2б	3б
7	2а	3в
8	2б	3а
9	2б	3в

Таблица 2.5

**Перестановка обозначения фаз**

№ вар	№ рисунка				№ вар	№ рисунка			
	ВН	НН				ВН	НН		
		рис	на- мотка	фази- ровка			рис	на- мотка	фази- ровка
1	2а	3а	прям	cab	17	2б	3б	прям	cab
2	2а	3а	прям	bca	18	2б	3б	прям	bca
3	2а	3а	обрат	bca	19	2б	3б	обрат	bca
4	2а	3а	обрат	cab	20	2б	3б	обрат	cab
5	2б	3а	прям	bca	21	2в	3б	прям	bca

Продолжение таблицы 2.5

№ вар	№ рисунка				№ вар	№ рисунка			
	ВН	НН				ВН	НН		
		рис	на- мотка	фази- ровка			рис	на- мотка	фази- ровка
6	2б	3а	прям	cab	22	2в	3б	прям	cab
7	2б	3а	обрат	bca	23	2в	3б	обрат	bca
8	2б	3а	обрат	cab	24	2в	3б	обрат	cab
9	2в	3а	прям	bca					
10	2в	3а	прям	cab					
11	2в	3а	обрат	bca					
12	2в	3а	обрат	cab					
13	2а	3б	прям	cab					
14	2а	3б	прям	bca					
15	2а	3б	обрат	bca					
16	2а	3б	обрат	cab					

## Контрольные вопросы

1. Конструкция однофазного трансформатора.
2. Конструкция трехфазного трансформатора.
3. Принцип действия идеального трансформатора.
4. Принцип действия трансформатора.
5. Какие параметры указываются в паспортных данных трансформатора?
6. Что такое коэффициент трансформации и как его рассчитать?
7. От чего зависит ЭДС, которая индуцируется в обмотках трансформатора основным магнитным потоком?
8. Напишите формулу для ЭДС обмоток трансформатора.
9. Как и для чего проводится опыт холостого хода трансформатора?
10. Как и для чего проводится опыт короткого замыкания?
11. Что такое напряжение короткого замыкания?
12. Что такое ток холостого хода?
13. Какая часть параметров  $T$ -образной схемы замещения определяется из опыта холостого хода?
14. Какая часть параметров  $T$ -образной схемы замещения определяется из опыта короткого замыкания?
15. Что такое внешняя характеристика трансформатора, объяснить ее вид.
16. При каких условиях достигается максимум К.П.Д. трансформатора?
17. Для чего нужно знать группу соединений обмоток  $Tr$ ?
18. От чего зависит номер группы соединений обмоток  $Tr$ ?
19. Как определяется группа соединений при совмещении «центров тяжести» векторных диаграмм ВН и НН?
20. Как определяется группа соединений при определении угла сдвига между линейными векторами ВН и НН?
21. Как зависит группа соединений от схемы соединений обмоток  $Tr$ ?
22. Как зависит группа соединений от направления намотки обмоток  $Tr$ ?
23. Как зависит группа соединений от фазировки обмоток  $Tr$ ?
24. При каких условиях образуется четная группа соединений, дать пример.
25. При каких условиях образуется нечетная группа соединений, дать пример.

### 3. Синхронные машины

#### 3.1. Общие сведения

В синхронных машинах в установившихся режимах частота вращения ротора  $\omega_r$  равняется частоте вращения поля  $\omega_c$ . При  $\omega = \omega_c$  частота тока в роторе  $f_2 = 0$ . В обмотке возбуждения, обычно расположенной на роторе, протекает постоянный ток. Синхронные машины могут работать в режимах генератора, двигателя и синхронного компенсатора. Наиболее распространенный режим работы синхронных машин — генераторный. Почти вся электроэнергия на Земле на электростанциях вырабатывается синхронными генераторами — турбо- и гидрогенераторами.

Синхронные двигатели применяются в электроприводах, где требуется постоянная частота вращения. Преимущество синхронных двигателей перед асинхронными — возможность работы с опережающим  $\cos\varphi$  или с  $\cos\varphi = 1$ , а также большая перегрузочная способность. Однако синхронные двигатели имеют плохие пусковые свойства, и для питания обмотки возбуждения требуется постоянный ток. Синхронные двигатели применяются в основном как мощные двигатели на мощности свыше  $600\text{ кВт}$  и как микродвигатели на мощности до  $1\text{ кВт}$ .

Реактивное сопротивление  $x_p$  находят по характеристикам холостого хода, короткого замыкания и расчетному значению составляющей тока возбуждения  $I_{\text{я}}$ , компенсирующей реакцию якоря при номинальном токе.

Синхронные машины находят применение также в качестве синхронных компенсаторов — генераторов реактивной мощности. При параллельной работе с сетью при перевозбуждении синхронная машина выдает в сеть реактивную мощность и является емкостью, а при недовозбуждении по отношению к сети синхронная машина является индуктивностью и потребляет из сети реактивную мощность.

Синхронные компенсаторы используются в энергосистемах как регулируемые емкости или индуктивности.

В конструктивном исполнении синхронные машины делятся на явно- и неявно- полюсные. Быстроходные машины выполняются с неявнополюсным ротором, а тихоходные — с явнополюсным.

Турбогенераторы предназначены для выработки электроэнергии в продолжительном номинальном режиме работы при непосредственном соединении с паровыми или газовыми турбинами. Турбогенераторы устанавливаются на тепловых и атомных электростанциях.

В зависимости от мощности турбогенераторы подразделяются на три основные группы: мощностью 2,5-32 *МВт*, 60-320 *МВт* и свыше 500 *МВт*. По частоте вращения различают турбогенераторы четырех- полюсные (на частоту вращения 1500 и 1800 *об/мин*) и двухполюсные (на частоту вращения 3000 и 3600 *об/мин*) соответственно на частоты сети 50 и 60 *Гц*.

По виду приводной турбины турбогенераторы классифицируются на генераторы, приводимые во вращение паровой турбиной, и генераторы с приводом от газовой турбины.

По системе охлаждения турбогенераторы подразделяются на машины с воздушным, с косвенным водородным, непосредственным водородным и жидкостным охлаждением.

По применяемой системе возбуждения турбогенераторы классифицируются на машины со статической системой самовозбуждения, независимой тиристорной системой возбуждения и бесщеточным возбуждением.

Гидрогенераторы — синхронные генераторы, приводимые во вращение гидравлическими турбинами, выпускаются в широкой номенклатуре мощностей до 800 *МВт* на частоты вращения от 46,9 до 1500 *об/мин*, напряжением до 18 *кВ*. По типу гидравлической турбины гидрогенераторы делятся на вертикальные и горизонтальные, а также обратимые для работы в качестве генератора или двигателя.

Гидрогенераторы выпускаются для климатического исполнения УХЛ4, Т4 и ТВ4.

Система вентиляции гидрогенераторов, за исключением машин малой мощности, замкнутая. Гидрогенераторы большой мощности выпускаются с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора

Генераторы с вертикальным валом подразделяются на два основных типа — подвесные и зонтичные, отличающиеся друг от друга расположением подпятника относительно ротора. При частотах вращения до 200 *об/мин* гидрогенераторы выполняются преимущественно в зонтичном исполнении, свыше 200 *об/мин* — в подвесном. При частотах вращения свыше

250 *об/мин* вертикальные гидрогенераторы выполняются исключительно в подвесном исполнении.

Синхронные компенсаторы применяют для регулирования режимов работы энергетических систем, для поддержания оптимального уровня напряжения, снижения потерь электроэнергии в сетях, увеличения пропускной способности и обеспечения устойчивости энергосистем.

Синхронные компенсаторы представляют собой синхронные машины, работающие в режиме двигателя без активной нагрузки и генерирующие в сеть реактивный опережающий (емкостный) или отстающий (индуктивный) ток. Синхронные компенсаторы мощностью 10, 16 и 25 *МВ-А* выпускаются с воздушным охлаждением. Напряжение компенсаторов мощностью до 16 *МВ-А* - 6,3 и 10,5 *кВ*, мощностью 25 *МВ-А* - 10,5 *кВ*, частота вращения 1000 *об/мин*. Компенсаторы могут работать с номинальной мощностью при изменении напряжения сети на  $\pm 5\%$ . При понижении напряжения на 10% ток статора может быть увеличен на 5%, т. е. мощность снижается на 5%.

Технически и экономически обоснованный нижний предел номинальных мощностей синхронных двигателей составляет 500 - 600 *кВт*. Синхронные двигатели с частотой вращения 1000 *об/мин* и ниже выпускаются с явнополюсными шихтованными роторами с демпферной обмоткой. Синхронные двигатели мощностью свыше 12500 *кВт* с частотой вращения 1500 *об/мин* выполняют, как правило, с массивными полюсами без специальной демпферной (пусковой) обмотки.

Синхронные двигатели с частотой вращения 3000 *об/мин* — турбодвигатели — имеют неявно выраженное исполнение полюсов ротора. Роторы этих двигателей выполняют из массивной поковки так же, как роторы турбогенераторов.

Синхронные двигатели выпускают в основном на напряжение 6000 и 10000 *В*. Номенклатура низковольтных двигателей на напряжение 380 *В*, имеющих мощность до 320 *кВт*, последовательно сокращается, и они заменяются на более экономичные асинхронные двигатели.

Большинство типов синхронных двигателей выпускают как машины общего назначения. Многие серии и типы синхронных двигателей предназначены для привода конкретных типов механизмов: компрессоров, различного ро-

да мельниц, вентиляторов, резиносмесителей и грануляторов, экскаваторных агрегатов и др.

По форме исполнения в отдельную группу выделяют вертикальные двигатели, которые применяют для привода насосов. Горизонтальные двигатели могут иметь исполнение с двумя и одним подшипником и консольное исполнение.

Важными классификационными характеристиками синхронных двигателей являются степень защиты и система вентиляции и охлаждения. По этому признаку синхронные двигатели подразделяют на: открытые или брызгозащищенные, закрытые с разомкнутым циклом вентиляции, закрытые с замкнутым циклом вентиляции и встроенными водяными охладителями, закрытые с замкнутым циклом вентиляции с встроенными воздушными охладителями, закрытые взрывозащищенные продуваемые под избыточным давлением.

Большинство двигателей имеют самовентиляцию, однако в машинах больших габаритов для охлаждения применяют и вентиляторы-наездники.

В настоящее время для возбуждения синхронных двигателей применяют только полупроводниковые статические или бесщеточные системы возбуждения.

Статические возбудители, как правило, питаются от постороннего источника. Выпускаются двигатели, которые имеют для питания возбуждения специальную дополнительную обмотку в пазах статора.

Бесщеточные возбудители обычно встраивают в конструкцию двигателя. В сериях СТД и СТДП применяют бесщеточное возбуждательное устройство, которое является самостоятельным изделием и пристраивается к двигателю.

В синхронных двигателях малых габаритов широко используют подшипники качения, в крупных — подшипники скольжения.

Диапазон габаритов синхронных двигателей весьма широк: внешние диаметры сердечников статоров нарастают от 740 до 4500 мм. В настоящее время проектируют сверхмощные двигатели. Наиболее распространенные серии явнополюсных синхронных двигателей имеют следующую структуру обозначения:

$$\begin{array}{cccc} \text{X} & \text{—} & \text{X} & \text{—} & \text{X} & \text{—} & \text{X} \\ 1 & & 2 & & 3 & & 4' \end{array}$$

в которой: 1 — условное название серии и номер модификации; 2 — условное обозначение габарита; 3 — длина сердечника статора, см; 4 — число полюсов.



На стенде завода-изготовителя производят приемо-сдаточные испытания каждой машины и приемочные головных (опытных) машин. По действующим стандартам (ГОСТ 183-74, ГОСТ 533-85, ГОСТ 5616-81, ГОСТ 609-84) приемо-сдаточные испытания каждой машины включают, в том числе, определение характеристики установившегося замыкания (для гидрогенераторов на месте установки), холостого хода (для гидрогенераторов на месте установки). В приемочные испытания головных (опытных) образцов (для гидрогенераторов на месте установки) дополнительно включают: испытания на кратковременную перегрузку по току; определение КПД; испытание на нагревание; определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, индуктивных сопротивлений и постоянных времени обмоток; испытание при ударном токе короткого замыкания, на нагрев; определение вибраций, номинального тока возбуждения и регулировочной характеристики.

*Характеристика холостого хода* представляет собой зависимость напряжения обмотки статора от тока возбуждения при номинальной частоте вращения. Рекомендуется производить измерение напряжения приборами классом точности не ниже 0,5, при этом могут быть использованы эксплуатационные трансформаторы напряжения. Измерение тока возбуждения можно производить также приборами класса точности 0,5 с применением шунтов класса 0,1 или 0,2. Во время определения характеристики контролируют частоту вращения гидрогенератора.

Предварительно напряжение машины увеличивают до 130% номинального. Характеристику снимают при плавном уменьшении тока возбуждения до нуля. При токе возбуждения, равном нулю, определяют остаточное напряжение. Одновременно со снятием характеристики холостого хода определяется симметрия напряжения, которая находится по отношению разности наибольшего и наименьшего измеренных линейных напряжений к среднему его значению.

*Характеристика установившегося короткого замыкания* представляет собой зависимость тока в обмотке статора от тока возбуждения генератора при трехфазном коротком замыкании. При снятии характеристики измеряют токи в каждой фазе обмотки статора и ток возбуждения. Снятие характеристики производят при плавном подъеме тока статора до номинального значения. Для генераторов, работающих в блоке с трансформатором, характеристику короткого замыкания снимают для замкнутого накоротко трансформатора.

При приемо-сдаточных испытаниях, как правило, определяют лишь *основные параметры*. отношение короткого замыкания (ОКЗ), реактивность Потье  $x_p$ , синхронное индуктивное сопротивление сверхпереходные индуктивные сопротивления  $X_d$  и  $X_q$ , переходное индуктивное сопротивление  $x_j$ , индуктивное сопротивление обратного следования фаз  $x_2$ , постоянную времени при разомкнутой  $Tj_0$  и замкнутой накоротко  $Tj$  обмотках статора.

Отношение короткого замыкания находят по характеристикам холостого хода и короткого замыкания как отношение номинального тока статора к установившемуся току короткого замыкания при возбуждении, соответствующем номинальному напряжению по характеристике холостого хода.

Индуктивное сопротивление  $x_d$  также находят по характеристикам холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) как частное от деления напряжения холостого хода, определенного по спрямленной характеристике холостого хода при некотором возбуждении, на ток короткого замыкания при том же токе возбуждения  $I_{\phi}$ . Реактивное сопротивление  $x_p$  находят по характеристикам холостого хода, короткого замыкания и расчетному значению составляющей тока возбуждения  $I_{\phi}$ , компенсирующей реакцию якоря при номинальном токе.

*Определение номинального тока возбуждения.* Номинальный ток возбуждения определяют методом непосредственной нагрузки или методом графического построения. В последнем случае номинальный ток возбуждения находят по характеристикам холостого хода, короткого замыкания и реактивности Потье  $x_p$ . Из характеристики холостого хода с учетом  $x_p$  находят ток  $I_{\phi}$ , из характеристики короткого замыкания — составляющую тока возбуждения  $I_{\kappa\text{З}}$  и по этим величинам — номинальный ток возбуждения.

### 3.2. Пример расчета и построения характеристик и диаграмм синхронного генератора

#### Исходные данные для расчета:

номинальная мощность,	$P_H = 100 \text{ MBm};$
номинальное напряжение,	$U_H = 15,75 \text{ кВ};$
коэффициент мощности	$\cos\varphi_H = 0,707;$
отношение короткого замыкания	$OKЗ = 1,5;$
индуктивное сопротивление рассеяния якоря,	$x_{\sigma a} = 0,2;$
схема соединения обмоток статора —	звезда.

1. Построение характеристики ХХ  $E_0 = f(I_B)$ .

При расчетах параметров СГ можно исходить из нормальной характеристики ХХ, полученной как средняя на основании большого количества испытаний машин. Эта характеристика, выраженная в о.е., представлена в табл. 1. Характеристика ХХ, построенная по данным этой таблицы представлена на рис. 3.1.

Таблица 1

**Нормальная характеристика ХХ**

$I_B$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2	2,5
$E_0$	0	0,29	0,56	0,82	1,0	1,15	1,23	1,27	1,31	1,33

2. Построение характеристики КЗ  $I_K = f(I_B)$ .

Так как характеристика КЗ прямолинейна, то построим её по двум точкам: 1) точка начала координат 0; 2) точка  $M$ , соответствующая единичной величине тока возбуждения и ОКЗ.

Для построения характеристика КЗ по величине ОКЗ при единичной величине тока возбуждения, находим  $I_{BK}$  – ток возбуждения, соответствующий по характеристике КЗ номинальному току якоря  $I_K = I_H$ :

так как  $OKЗ = \frac{I_{B0}}{I_{BK}} = \frac{1}{I_{BK}}$ , то  $I_{BK} = \frac{1}{OKЗ} = \frac{1}{1,5} = 0,67$ . На рис. 3.1 характеристика КЗ представлена прямой  $OM$ .

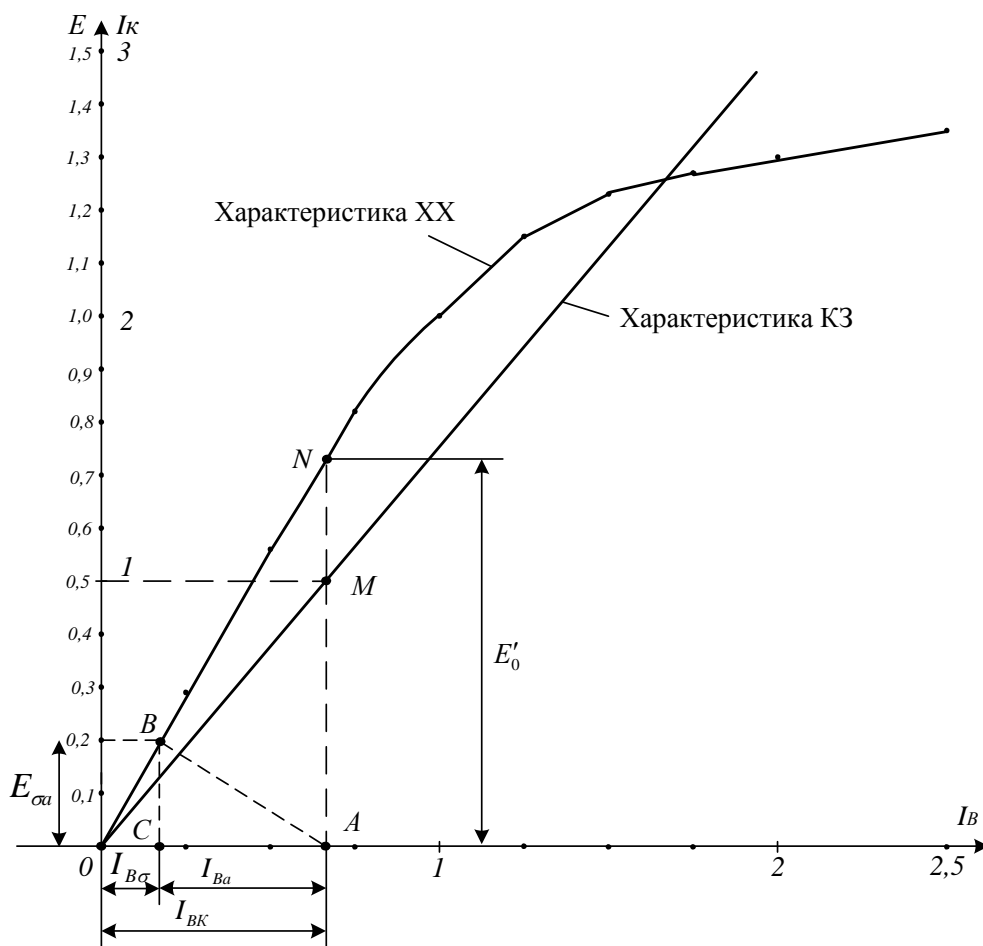


Рис. 3.1. Характеристики XX и КЗ и треугольник КЗ синхронного генератора

### 3. Построение треугольника КЗ.

На рис. 1 точку  $M$  для тока  $I_K = I_H = 1$  сносим на ось абсцисс – получаем точку  $A$ . ЭДС рассеяния, выраженную в о.е.:  $E_{\sigma a} = I_H \cdot x_{\sigma a} = 1 \cdot 0,2 = 0,2$ , откладываем на оси ординат и сносим на характеристику XX – получаем точку  $B$ . Из точки  $B$  опускаем перпендикуляр на ось абсцисс – получаем точку  $C$ .  $\Delta CBA$  – треугольник КЗ.

### 4. Определение МДС реакции якоря при номинальном режиме

МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения определяется отрезком  $[CA]$  на рис. 3.1.

### 5. Вычисление синхронных реактивных сопротивлений $x_d$ и $x_q$ .

Продолжая перпендикуляр на рис. 1 от точки  $A$  до пересечения с характеристикой XX – получим т.  $N$ . Отрезок  $[AN]$  соответствует ЭДС  $E'_0 = 0,73$ . По этой ЭДС определяем синхронное реактивное сопротивление по продоль-

ной оси  $x_d = \frac{E'_0}{I_H} = \frac{0,73}{1} = 0,73$ . Синхронное реактивное сопротивление по поперечной оси можно принять равным  $x_q = 0,64 \cdot x_d = 0,64 \cdot 0,73 = 0,47$ .

#### 6. Построение диаграммы МДС (диаграммы Потье)

Активным сопротивлением обмотки статора, ввиду его малости, пренебрегаем. На рис. 3.2 строим такую же характеристику ХХ, как на рис. 3.1. На этом же рисунке совместим вектор  $U_{H\Phi} = 1$  с положительным направлением оси ординат. Проводим вектор тока  $I_H$  под углом  $\varphi_H = \arccos(\varphi_H) = \arccos(0,707) = 45^\circ$  к вектору напряжения  $U_{H\Phi}$ . Под углом  $90^\circ$  к току  $I_H$  проводим прямую через конец вектора напряжения  $U_{H\Phi}$ . По этой линии от конца вектора  $U_{H\Phi}$  откладываем вектор ЭДС рассеяния обмотки якоря  $E_{\sigma a} = 0,2$  – получаем точку  $B$ .

Соединяя точку  $B$  с точкой начала координат  $O$  – получаем вектор индуктируемой в генераторе ЭДС  $E_\delta$ . Поворачивая этот вектор до совмещения его с осью ординат – получаем точку  $B'$ . Сносим точку  $B'$  на характеристику ХХ в точку  $B''$ . Из точки  $B''$  опускаем перпендикуляр на ось абсцисс до точки  $A$ . Отрезок  $[OA]$  является величиной тока возбуждения  $E_{B\delta}$ , необходимого для создания ЭДС  $E_\delta$ .

Для учета РЯ воспользуемся диаграммой рис.3.1. Отрезок  $[CA]$  является МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения  $I_{Ba} = 0,48$ . Для получения полного тока возбуждения  $I_{B0}$  сложим геометрически векторы  $I_{B\delta}$  и  $I_{Ba}$ , где угол  $\varphi' = \varphi_H + \theta = 45^\circ + 7^\circ = 52^\circ$  (угол  $\theta$  – это угол нагрузки – угол сдвига между напряжением на зажимах машины  $U_H$  и ЭДС, индуктируемой в генераторе  $E_\delta$ ). Описав дугу радиусом  $OC$  до пересечения с осью абсцисс в точке  $D$ , получим ток возбуждения  $I_{B0} = [OD]$ . При сбросе нагрузки этот ток возбуждения создаст ЭДС  $E_0 = [DH]$ .



$$I_d = I_H \cdot \sin \psi_H = 1 \cdot \sin(56^\circ) = 0,829 ;$$

$$I_q = I_H \cdot \cos \psi_H = 1 \cdot \cos(56^\circ) = 0,559.$$

Составляющие полной ЭДС реакции якоря  $E_a$  по продольной и поперечной осям:

$$E_d = I_d \cdot x_d = 0,829 \cdot 0,73 = 0,605;$$

$$E_q = I_q \cdot x_q = 0,559 \cdot 0,47 = 0,263.$$

Силовые линии магнитного поля возбуждения ( $\Phi_B$ ) и МДС обмотки возбуждения ( $F_B$ ) направлены вдоль оси  $d$ . А индуцируемая этим полем ЭДС  $E_0$  отстает от этого поля (и от оси  $d$ ) на  $90^\circ$ , следовательно индуцируемая ЭДС  $E_0$  направлена по оси  $q$ .

По найденным величинам строим диаграмму ЭДС (рис. 3.3). При построении учитывать, что вектор  $E_d$  опережает на  $90^\circ$  вектор тока  $I_d$ , а вектор  $E_q$  – на  $90^\circ$  вектор тока  $I_q$ .

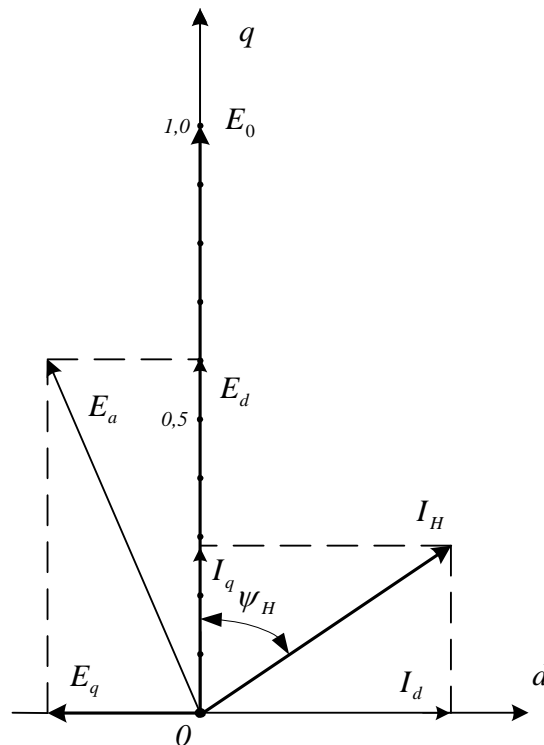


Рис. 3.3. Диаграмма ЭДС (диаграмма Blondеля) для номинального режима синхронного генератора

### 8. Построение диаграммы МДС для различных нагрузок

Задаемся различными реактивными токами  $I_p = 0; 0,5; 0,75; \text{ и } 1 \text{ А}$  при постоянной активной составляющей  $I_a = 0,5 \text{ А}$ . По активной и реактивной составляющим тока определяем полный ток:

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_{p0}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0^2} = 0,5;$$

$$I_1 = \sqrt{I_a^2 + I_{p1}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} = 0,71;$$

$$I_2 = \sqrt{I_a^2 + I_{p2}^2} = \sqrt{0,5^2 + 0,75^2} = 0,91;$$

$$I_3 = \sqrt{I_a^2 + I_{p3}^2} = \sqrt{0,5^2 + 1^2} = 1,12.$$

Коэффициент мощности и соответствующие углы равны:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_a}{I_0} = \frac{0,5}{0,5} = 1; \quad \text{нагрузка чисто активная } \varphi_0 = 0;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_a}{I_1} = \frac{0,5}{0,71} = 0,704; \quad \varphi_1 = \arccos (0,704) = 45^0;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{I_a}{I_2} = \frac{0,5}{0,91} = 0,55; \quad \varphi_2 = \arccos (0,55) = 57^0;$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{I_a}{I_3} = \frac{0,5}{1,12} = 0,45; \quad \varphi_3 = \arccos (0,45) = 63^0.$$

Зная эти величины, строим диаграмму МДС (рис. 3.4). Диаграмма строится в о.е. При чисто активной нагрузке ( $I_a = 0,5$ ) полный ток  $I_0$  совпадает с вектором напряжения  $U_{H\Phi}$  и равен  $I_0 = I_a = 0,5$ . Т.к.  $I_a = \text{const}$ , то концы векторов полного тока опираются на прямую, проходящую параллельно оси абсцисс через точку  $C$ . Под углами  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  проводим прямые для отстающего тока (вектор результирующего тока отстаёт от напряжения). Для опережающего тока произвольно задаёмся двумя значениями углов  $\varphi_4 = -30^0$  и  $\varphi_5 = -45^0$



и проводим линии. На этих линиях из начала координат до пересечения с прямой, проведенной через точку  $C$ , откладываем вектора полных токов  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ . Значение токов  $I_4$  и  $I_5$  вычисляем по заданным углам:

$$I_4 = \frac{I_a}{\cos(\varphi_4)} = \frac{0,5}{\cos(-30^\circ)} = 0,57;$$

$$I_5 = \frac{I_a}{\cos(\varphi_5)} = \frac{0,5}{\cos(-45^\circ)} = 0,71.$$

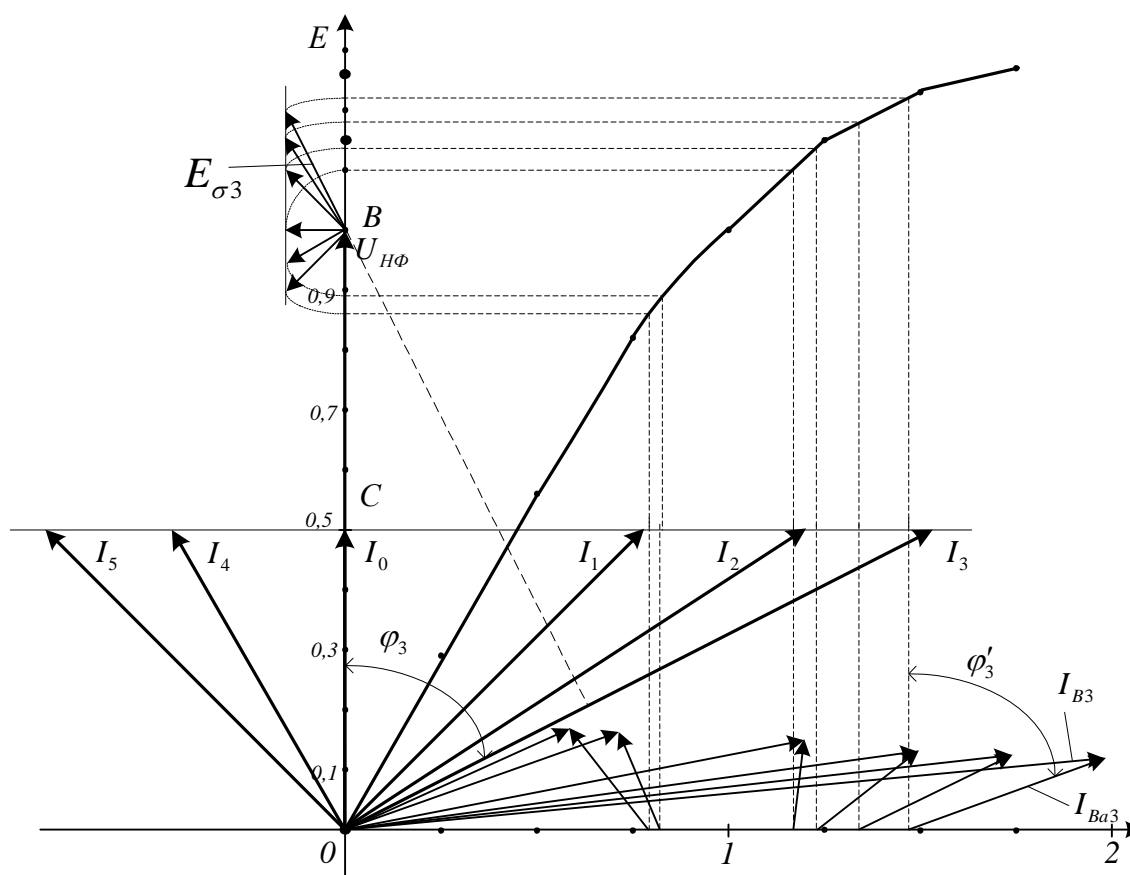


Рис. 3.4. Диаграмма МДС синхронного генератора для различных нагрузок

Находим значения ЭДС рассеяния для каждого тока нагрузки:

$$E_{\sigma 0} = I_0 \cdot x_{\sigma a} = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1;$$

$$E_{\sigma 1} = I_1 \cdot x_{\sigma a} = 0,71 \cdot 0,2 = 0,14;$$

$$E_{\sigma 2} = I_2 \cdot x_{\sigma a} = 0,91 \cdot 0,2 = 0,18;$$

$$E_{\sigma 3} = I_3 \cdot x_{\sigma a} = 1,12 \cdot 0,2 = 0,22;$$

$$E_{\sigma 4} = I_4 \cdot x_{\sigma a} = 0,57 \cdot 0,2 = 0,11;$$

$$E_{\sigma 5} = I_5 \cdot x_{\sigma a} = 0,71 \cdot 0,2 = 0,14.$$

Вектора, соответствующие этим ЭДС, откладываем от конца вектора напряжения  $U_{H\Phi}$  (точки  $B$ ) под прямым углом к векторам соответствующих полных токов.

Частичные значения МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения находим по формуле  $I_{Bai} = I_{Ba} \cdot I_i$ , где  $I_{Ba} = 0,48$  получено графически из рис. 3.1. В результате расчета для различных полных токов частичные значения МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения равны:

$$I_{Ba0} = I_{Ba} \cdot I_0 = 0,48 \cdot 0,5 = 0,24;$$

$$I_{Ba1} = I_{Ba} \cdot I_1 = 0,48 \cdot 0,71 = 0,34;$$

$$I_{Ba2} = I_{Ba} \cdot I_2 = 0,48 \cdot 0,91 = 0,44;$$

$$I_{Ba3} = I_{Ba} \cdot I_3 = 0,48 \cdot 1,12 = 0,54;$$

$$I_{Ba4} = I_{Ba} \cdot I_4 = 0,48 \cdot 0,57 = 0,27;$$

$$I_{Ba5} = I_{Ba} \cdot I_5 = 0,48 \cdot 0,71 = 0,34.$$

Далее, концы векторов  $E_{\sigma i}$  поворачиваем вокруг точки  $B$  до пересечения с осью ординат. Точки, полученные на оси ординат, сносим на характеристику ХХ и из них опускаем перпендикуляры до пересечения с осью абсцисс.

Из этих полученных точек под углом  $\varphi' = \varphi + \theta$  откладываем в масштабе тока возбуждения частичные значения МДС реакции якоря. Замыкающий вектор даст необходимый ток возбуждения при определённой нагрузке:

$$\varphi_0' = \varphi_0 + \theta = 0 + 7^0 = 7^0; \quad I_{B0} = 1,2;$$

$$\varphi_1' = \varphi_1 + \theta = 45^0 + 7^0 = 52^0; \quad I_{B1} = 1,52;$$

$$\varphi_2' = \varphi_2 + \theta = 57^0 + 7^0 = 64^0; \quad I_{B2} = 1,76;$$

$$\varphi_3' = \varphi_3 + \theta = 63^0 + 7^0 = 70^0; \quad I_{B3} = 2;$$

$$\varphi_4' = \varphi_4 + \theta = -30^0 + 7^0 = -23^0; \quad I_{B4} = 0,78;$$

$$\varphi_5' = \varphi_5 + \theta = -45^0 + 7^0 = -38^0; \quad I_{B5} = 0,64.$$

На диаграмме МДС (рис. 4) углы ( $\varphi_3, \varphi_3'$ ) и векторы ( $E_{\sigma 3}, I_{Ba3}, I_{B3}$ ) показаны только для режима № 3.

#### *9. Построение U-образной характеристики генератора.*

##### *9.1. при активном токе статора $I_a = 0,5$*

По рассчитанным токам нагрузки (п.8) и соответствующим токам возбуждения, полученным в результате построения (рис. 3.4), составим таблицу 2 для построения U-образной характеристики при  $I_a = 0,5$ . Соответствующая характеристика построена на рис. 3.5.

Таблица 2

#### ***Данные для построения U-образной характеристики для $I_a = 0,5$***

Порядковый номер режима	5	4	0	1	2	3
$I, A$	0,71	0,57	0,5	0,71	0,91	1,12
$I_B, A$	0,64	0,78	1,2	1,52	1,76	2

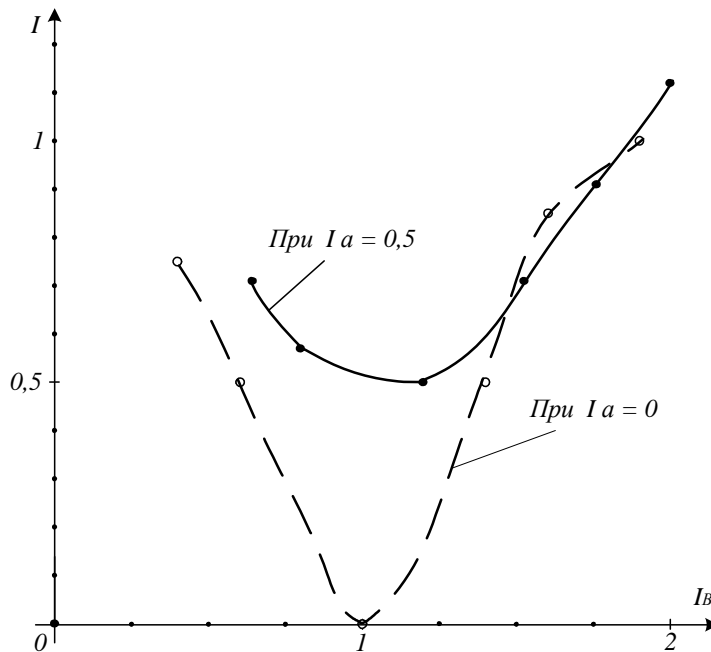


Рис. 3.5. U-образные характеристики синхронного генератора

9.2 при активном токе статора  $I_a = 0$ .

Мощность является чисто реактивной ( $\cos\varphi = 0$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ) поэтому реактивные токи нагрузки  $I_p$  и соответствующие токи возбуждения  $I_{B0}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{B3}$ ,  $I_{B4}$ ,  $I_{B5}$  откладываются по оси абсцисс (рис. 3.6). При отстающем токе нагрузки ( $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{B3}$ ) соответствующие составляющие ( $I_{B\delta}$  и  $I_{Ba}$ ) складываются, а при опережающем ( $I_{B4}$ ,  $I_{B5}$ ) – составляющие  $I_{B\delta}$  и  $I_{Ba}$  вычитаются. ЭДС рассеяния  $E_{\sigma a}$  при отстающем токе откладывается вверх от точки  $B$ , а при опережающем – вниз.

Для построения диаграммы МДС при  $I_a = 0$  реактивные токи для отстающих токов нагрузки примем те же:  $I_p = 0$ ; 0,5; 0,75, а для опережающих:  $I_p = 0,5$  и 0,75. Так как  $I_a = 0$ , то полные токи равны реактивным. Находим значения ЭДС рассеяния для каждого тока нагрузки:

$$I_0 = 0; \quad E_{\sigma 0} = I_0 \cdot x_{\sigma a} = 0 \cdot 0,2 = 0;$$

$$I_1 = 0,5; \quad E_{\sigma 1} = I_1 \cdot x_{\sigma a} = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1;$$

$$I_2 = 0,75; \quad E_{\sigma 2} = I_2 \cdot x_{\sigma a} = 0,75 \cdot 0,2 = 0,15;$$

$$I_3 = 1; \quad E_{\sigma 3} = I_3 \cdot x_{\sigma a} = 1 \cdot 0,2 = 0,2;$$

$$I_4 = 0,5; \quad E_{\sigma 4} = I_4 \cdot x_{\sigma a} = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1;$$

$$I_5 = 0,75; \quad E_{\sigma 5} = I_5 \cdot x_{\sigma a} = 0,75 \cdot 0,2 = 0,15.$$

Частичные значения МДС реакции якоря в масштабе тока возбуждения для тех же токов нагрузки равны:

$$I_{Ba0} = I_{Ba} \cdot I_0 = 0,48 \cdot 0 = 0;$$

$$I_{Ba1} = I_{Ba} \cdot I_1 = 0,48 \cdot 0,5 = 0,24;$$

$$I_{Ba2} = I_{Ba} \cdot I_2 = 0,48 \cdot 0,75 = 0,36;$$

$$I_{Ba3} = I_{Ba} \cdot I_3 = 0,48 \cdot 1 = 0,48;$$

$$I_{Ba4} = I_{Ba} \cdot I_4 = 0,48 \cdot 0,5 = 0,24;$$

$$I_{Ba5} = I_{Ba} \cdot I_5 = 0,48 \cdot 0,75 = 0,36.$$

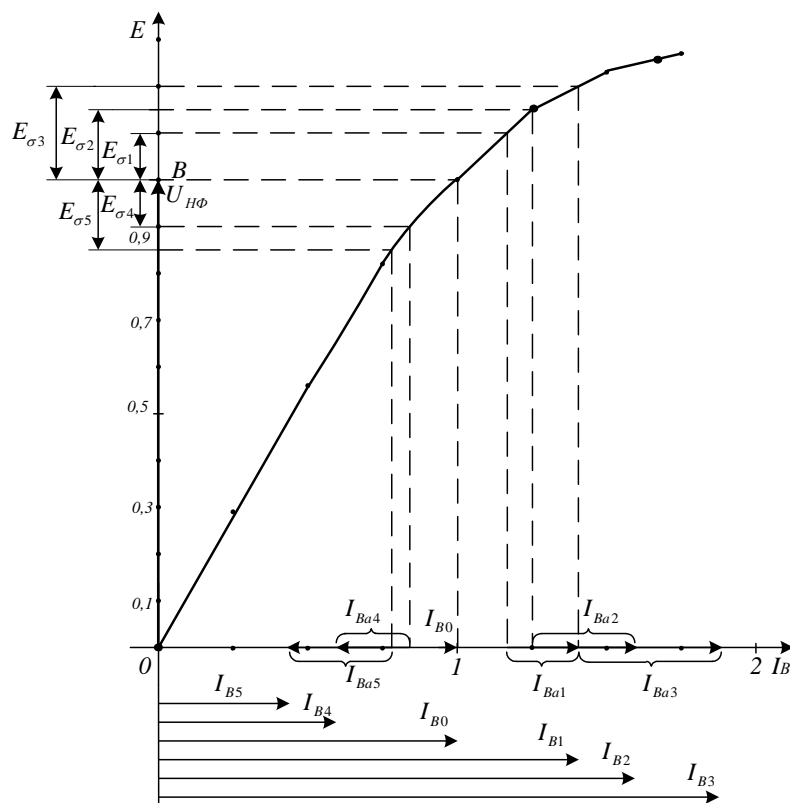


Рис. 3.6. Диаграмма МДС синхронного генератора при  $I_a=0$

По токам нагрузки и соответствующим токам возбуждения, полученным в результате построения (рис. 3.6), составим таблицу 3 для построения  $U$ -образной характеристики при  $I_a = 0$ . Соответствующая характеристика также построена на рис. 3.5.

Таблица 3

**Данные для построения  $U$ -образной характеристики для  $I_a = 0$**

Порядковый номер режима	5	4	0	1	2	3
$I, A$	0,75	0,5	0	0,5	0,75	1
$I_B, A$	0,4	0,6	1,0	1,4	1,6	1,9

**3.3. Данные для расчета и построения характеристик и диаграмм синхронного генератора**

Для трехфазного синхронного генератора (СГ) с параметрами, представленными в табл. 4, в соответствии со своим вариантом:

1. Построить характеристику холостого хода (ХХ).
2. Построить характеристику короткого замыкания (КЗ).
3. Построить треугольник КЗ.
4. Определить МДС реакции якоря (РЯ) при номинальном режиме.
5. Вычислить синхронные реактивные сопротивления по продольной и поперечной оси для ненасыщенного генератора.
6. Построить диаграмму МДС (диаграмму Потье) для номинального режима.
7. Построить диаграмму ЭДС (диаграмму Blondеля).
8. Построить диаграмму МДС для различных нагрузок.
9. Построить  $U$ -образную характеристику генератора при его работе параллельно с сетью бесконечной мощности при активном токе статора  $I_a = 0,5$  и  $I_a = 0$ .

Все расчеты и построения выполнять в относительных единицах (о.е.). За базисное значение (за единицу) принимаем: номинальное фазное напряжение при холостом ходе  $U_{H\Phi} = E_0 = 1$ , номинальный фазный ток  $I_{\Phi H} = 1$ ,

номинальное полное сопротивление  $z = \frac{U_H}{I_H} = \frac{E_0}{I_H} = 1$  и ток возбуждения

$I_{B0} = 1$ , соответствующий по характеристике ХХ номинальному напряжению  $U_{H\Phi} = E_0 = 1$ .

Далее, если расчет выполнен в именованных единицах ( $B$ ,  $A$ ,  $Ом$ ,  $Вт$  и т.д.), то эти единицы проставляются, а если в о.е. – то эти единицы не указываются.

Таблица 4

**Исходные данные для расчета**

№ варианта	$P_H, МВт$	$U_H, кВ$	$\cos \varphi_H$	$OK3$	$x_{\sigma a}$
0	6,875	6,6	0,8	2	0,11
1	7,5	6,6	0,75	1	0,12
2	8,25	6,6	0,8	0,78	0,14
3	9,4	10,5	0,85	0,2	0,12
4	9,5	10,5	0,75	1,2	0,1
5	11	6,6	0,7	0,88	0,12
6	11,25	3,3	0,8	0,85	0,16
7	16,25	3,3	0,85	1,4	0,15
8	1,75	10,5	0,7	1,25	0,135
9	18,75	10,5	0,8	1,1	0,13
10	19	10,5	0,8	1,25	0,15
11	15	10,5	0,85	1,36	0,25
12	0,59	6,3	0,75	1,4	0,28
13	100	15,75	0,7	1,5	0,2
14	1,5	6,3	0,8	1,45	0,21
15	6	3,1	0,82	1,3	0,18
16	9,2	13	0,8	1,2	0,261
17	32	13,2	0,85	1	0,236
18	3	3,15	0,84	1,1	0,27
19	25	10,5	0,82	0,95	0,18
20	0,204	3,15	0,78	0,9	0,19
21	37	10	0,75	0,8	0,2
22	50	10,5	0,7	0,6	0,15
23	62	13	0,8	0,7	0,11
24	8	6,6	0,73	0,65	0,25
25	1,76	2,3	0,79	0,75	0,2
26	1,5	3,15	0,74	0,55	0,18
27	0,212	0,4	0,82	0,4	0,11
28	12	10,5	0,85	1,2	0,14
29	24	11	0,87	1,35	0,16
30	3,72	6,3	0,8	0,3	0,19

## Контрольные вопросы

1. Конструкция, принцип действия явнополюсного синхронного генератора.
2. Конструкция, принцип действия неявнополюсного синхронного генератора.
3. Способы возбуждения синхронных машин
4. Внешние характеристики синхронного генератора.
5. Регулировочная характеристика синхронного генератора.
6. Как построить характеристику ХХ синхронной машины?
7. Как построить характеристику КЗ синхронной машины?
8. Что определяется из характеристики ХХ?
9. Что определяется из характеристики КЗ?
10. Что такое треугольник КЗ?
11. Как определить МДС реакции якоря при номинальном режиме работы СМ?
12. От чего зависит величина синхронные реактивные сопротивления по продольной оси СМ?
13. От чего зависит величина синхронные реактивные сопротивления по поперечной оси СМ?
14. Что такое диаграмма Потье?
15. Для чего строится диаграмма Потье?
16. Как построить диаграмму Потье при номинальном режиме работы СМ?
17. Что такое диаграмма Blondеля?
18. Для чего строится диаграмма Blondеля?
19. Как построить диаграмму Blondеля?
20. Как построить диаграмму МДС для различных нагрузок?
21. Что такое  $U$ -образная характеристика синхронного генератора?
22. Для чего строится  $U$ -образная характеристика синхронного генератора?
23. Как построить  $U$ -образную характеристику синхронного генератора при активном токе статора  $I_a = 0,5$ ?
24. Как построить  $U$ -образную характеристику синхронного генератора при активном токе статора  $I_a = 0$ ?



## ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Электромеханика. - М.: Издательский центр «Академия», 2007. — 512 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. - М.: ВШ, 2006. – 607 с.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока.: - Питер, 2008. – 350 с.
4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины постоянного тока и трансформаторы.: - Питер, 2008. – 320 с.
5. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т. /под редакцией И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, Т.1 – 1988.-456 с., Т.2 – 1989,-688 с.
6. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. Ростов н/Д: Феникс, 2004. – 415 с.
7. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 480 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Машины постоянного тока.....</b>	<b>6</b>
1.1. Общие сведения.....	6
1.2. Расчет магнитной цепи машины постоянного тока.....	7
1.3. Пример расчета магнитной цепи машины постоянного тока.....	22
1.4. Задание для расчета магнитной цепи машины постоянного тока.....	30
<b>2. Трансформаторы.....</b>	<b>38</b>
2.1. Общие сведения и классификация силовых трансформаторов.....	38
2.1.1. Основные определения.....	38
2.1.2. Классификация силовых трансформаторов общего назначения.....	39
2.1.3. Номинальные данные и параметры трансформаторов.....	44
2.2. Расчет параметров трансформатора по номинальным данным.....	45
2.2.1. Построение характеристик трансформаторов.....	45
2.2.2. Пример расчета характеристик трансформатора по номинальным данным.....	53
2.2.3. Задание для расчета характеристик трансформатора по номинальным данным.....	62
2.3. Способы определения номера группы соединений обмоток транс- форматора.....	63
2.3.1. Общие сведения.....	63
2.3.2. Способы определения группы соединения трансформатора.....	64
2.3.3. Схемы соединения обмоток трансформатора и их векторные диа- граммы.....	65
2.3.4. Определение группы соединений обмоток трансформаторов.....	68
2.3.5. Задания для определения группы соединений трансформаторов...	74
<b>3. Синхронные машины.....</b>	<b>78</b>
3.1. Общие сведения.....	78
3.2. Пример расчета и построения характеристик и диаграмм синхронного генератора.....	83
3.3. Данные для расчета и построения характеристик и диаграмм синхронного генератора.....	95
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>98</b>