

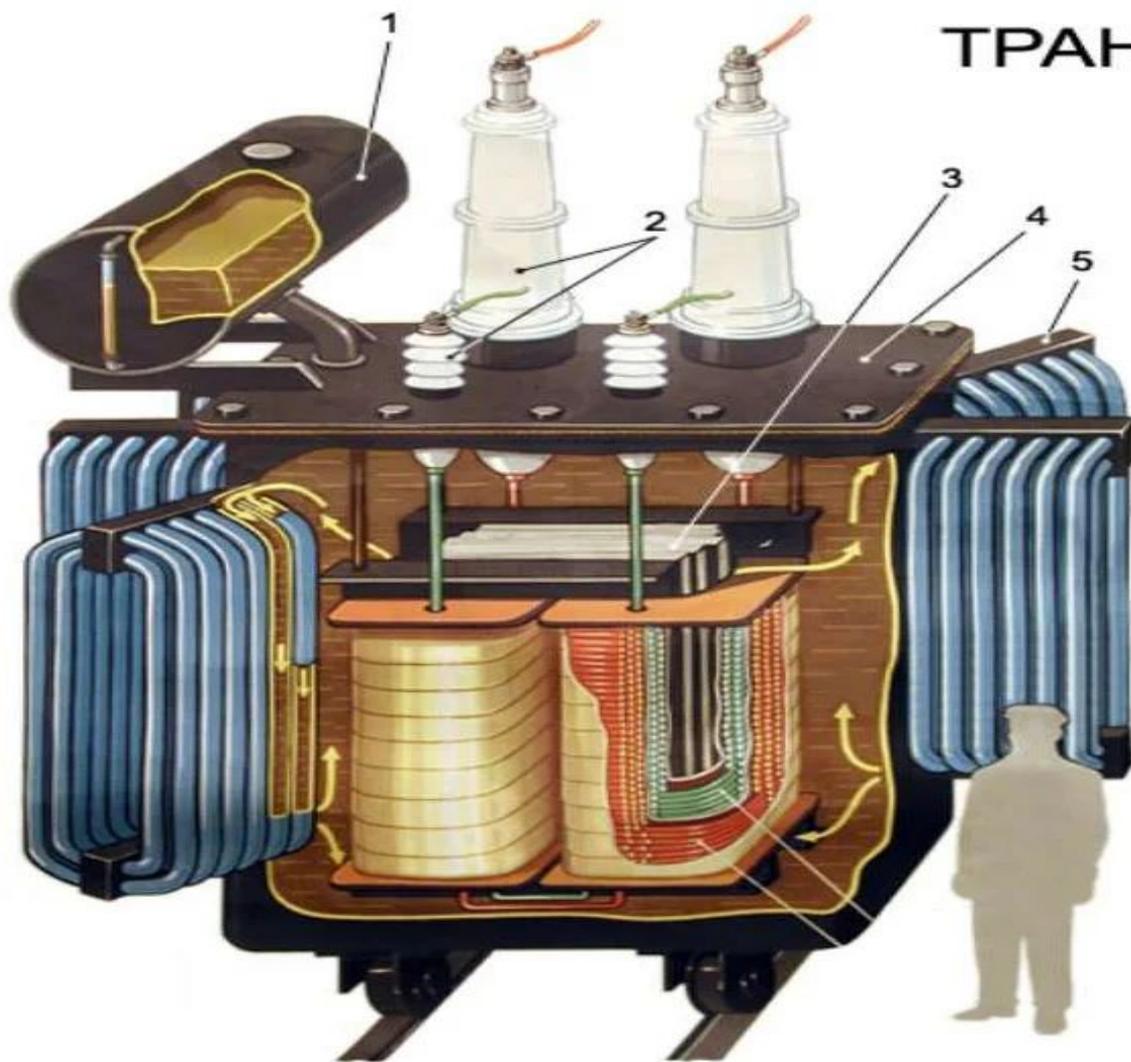
Трансформаторы

Трансформаторы

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, имеющий две (или более) индуктивно связанные обмотки и служащий для преобразования энергии переменного тока с одними параметрами в энергию переменного тока с другими параметрами.

Трансформаторы позволяют передавать мощность от источника к приёмнику при разных напряжениях и токах. Трансформаторы используются для преобразования электрической энергии при передаче её на расстояния, во вторичных источниках электропитания и в различных электронных схемах.

ТРАНСФОРМАТОР

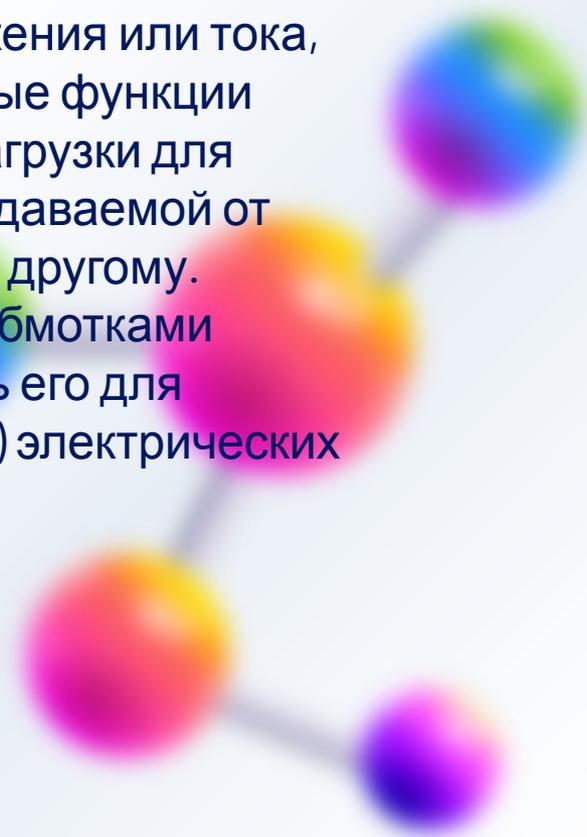


1. Расширительный бак
2. Изолятор
3. Сердечник трансформатора
4. Крышка бака трансформатора
5. Радиаторы
6. Обмотка низкого напряжения
7. Обмотка высокого напряжения

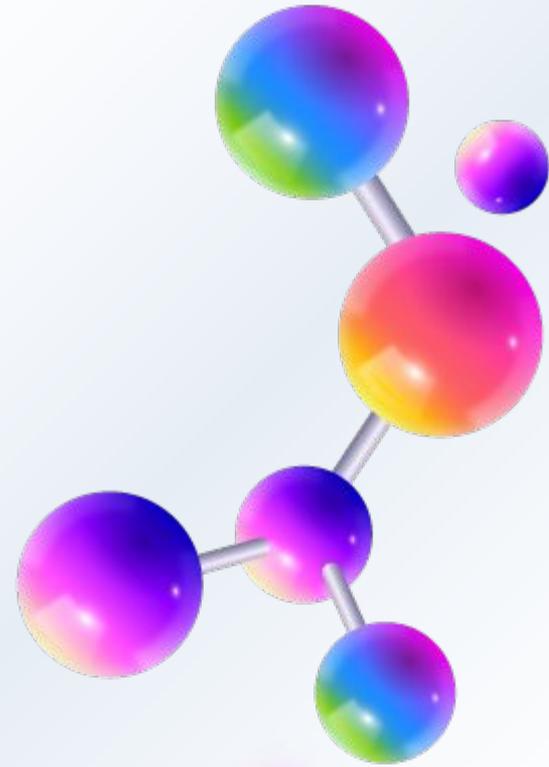


01

Кроме преобразования величины напряжения или тока, трансформаторы выполняют очень важные функции согласования напряжений источника и нагрузки для обеспечения максимума мощности, передаваемой от одного электротехнического устройства к другому. Отсутствие электрической связи между обмотками трансформатора позволяет использовать его для гальванического разделения («развязки») электрических цепей.



Впервые с техническими целями трансформатор был применён П. Н. Яблочковым в 1876 г. для питания электрических свечей, но особенно широко трансформаторы стали применяться после того, как в 1891 г. М. О. Доливо-Добровольским была предложена трёхфазная система передачи электроэнергии и в 1889 г. им же разработана конструкция первого трёхфазного трансформатора





По назначению, согласно ГОСТ 16110–82, различают:

силовые трансформаторы общего назначения (однофазные и трёхфазные);

трансформаторы специального назначения (сварочные, импульсные, трансформаторы для устройств автоматики, трансформаторные умножители частоты, испытательные и измерительные и т.д.).

Конструктивно трансформаторы классифицируются: • по виду охлаждения (с воздушным охлаждением – «сухие» и с охлаждением минеральным маслом – «масляные»);

- по количеству фаз (однофазные и трёхфазные);
- по числу обмоток на фазу (двух- и многообмоточные);
- по форме магнитопровода (стержневые, броневые, тороидальные и т.д.).

Условные графические обозначения трансформаторов в электрических схемах регламентирует ГОСТ 2.723-68 ЕСКД.

Устройство однофазного трансформатора

Трансформатор выполнен на базе замкнутого магнитопровода (сердечника), на котором имеются обмотки. Магнитопровод выполняет две функции: во-первых, он является носителем основного магнитного потока аппарата, а во-вторых, он предназначен для крепления обмоток, отводов, переключателей и корпуса самого трансформатора.

Внешний вид однофазного трансформатора

Трансформатор обычно имеет одну первичную и одну или несколько вторичных обмоток, выполненных из алюминиевого или медного изолированных проводов. Обмоточные провода покрыты эмалевой и хлопчатобумажной или шёлковой изоляцией. В «сухих» трансформаторах применяются провода с термостойкой изоляцией из стекловолокна. Обмотки трансформатора связаны только индуктивно и не имеют гальванической связи. Обмотка, подключаемая к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а вторая обмотка – обмоткой низшего напряжения (НН).

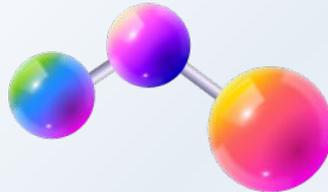
Если число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной, то напряжение на выходе будет меньше напряжения на входе трансформатора. Такой трансформатор называется понижающим. В противном случае трансформатор называется повышающим.

Трансформатор обладает свойством обратимости, т.е. в результате переключения обмоток он может работать и как повышающий, и как понижающий. Однако обычно его конструкция и параметры оптимизированы для определенного типа преобразования. Например, первичная обмотка понижающего трансформатора с большим количеством витков выполняется тонким проводом, а вторичная обмотка с многократно меньшим количеством витков – толстым. По способу расположения на стержнях обмотки подразделяются на концентрические и чередующиеся. Концентрические обмотки выполняются в виде цилиндров, геометрические оси которых совпадают с осью стержней. Ближе к стержню обычно располагается обмотка НН, так как это позволяет уменьшить изоляционный промежуток между обмоткой и стержнем. В чередующихся обмотках ВН и НН их витки поочередно располагают вдоль стержня по высоте.

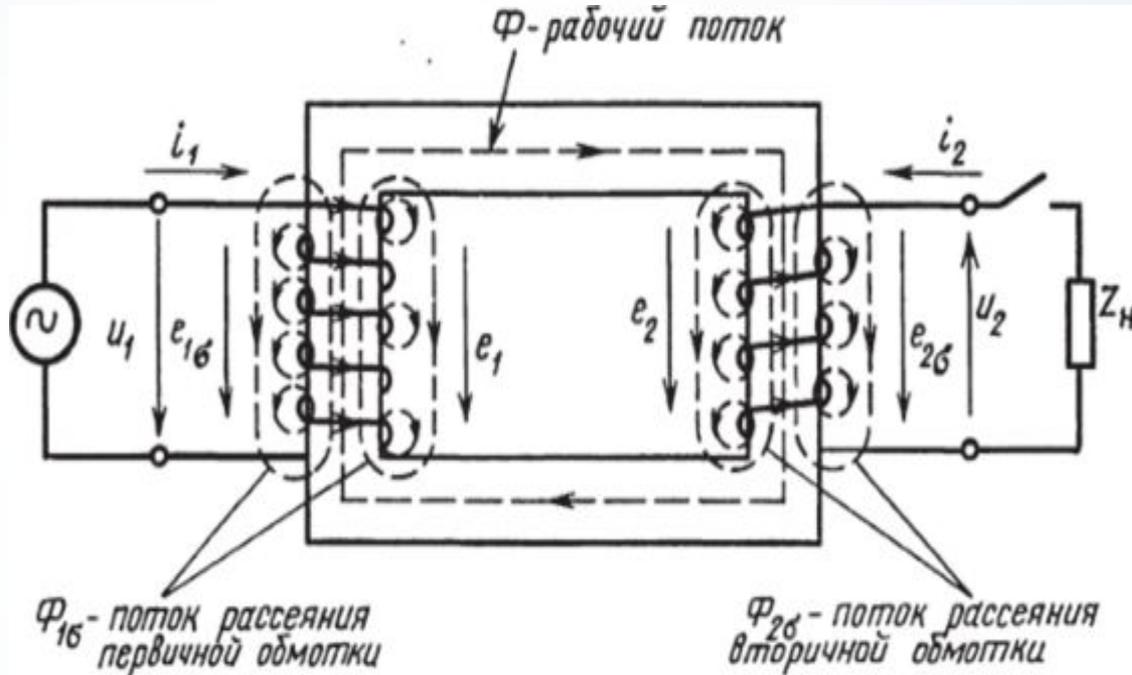
У трансформатора стержневого типа обмотки хорошо видны, но они скрывают за собой стержни магнитной системы сердечника. Видно только верхнее и нижнее ядро сердечника. Каждая обмотка состоит из двух частей, расположенных на разных стержнях, причём эти части могут соединяться между собой как параллельно, так и последовательно. Расположение одной обмотки внутри другой обеспечивает увеличение электромагнитной связи между ними. Однофазный трансформатор броневой конструкции имеет внутренние стержни с обмотками и развитые ядра, охватывающие обмотки снаружи, подобно «броне». Ось обмоток стержневого типа, как правило, имеет вертикальное положение, в то время как в броневой конструкции она может быть горизонтальной или вертикальной. В броневых трансформаторах электромагнитная связь обмоток несколько больше, чем в стержневых, но они сложнее конструктивно и технологически, поэтому броневой тип магнитопровода используется только в маломощных трансформаторах.

Принцип действия однофазного трансформатора

Принцип действия однофазного трансформатора состоит в следующем: к первичной обмотке А–Х подводится питающее напряжение U_1 с частотой f_1 . Со вторичной обмотки а–х снимается напряжение U_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии. Каждая обмотка характеризуется количеством витков (w_1 у первичной и w_2 у вторичной), активным R_i , реактивным индуктивным X_i и полным Z_i сопротивлениями

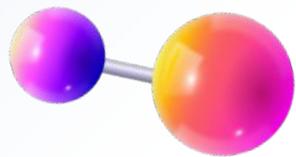


Электромагнитная схема однофазного трансформатора

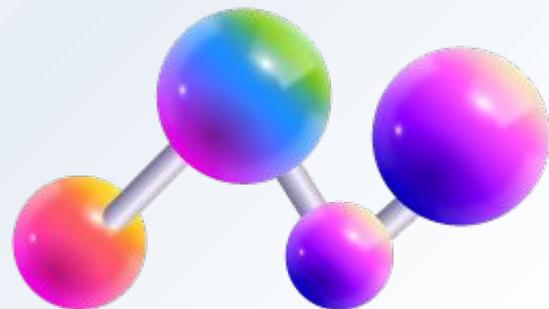


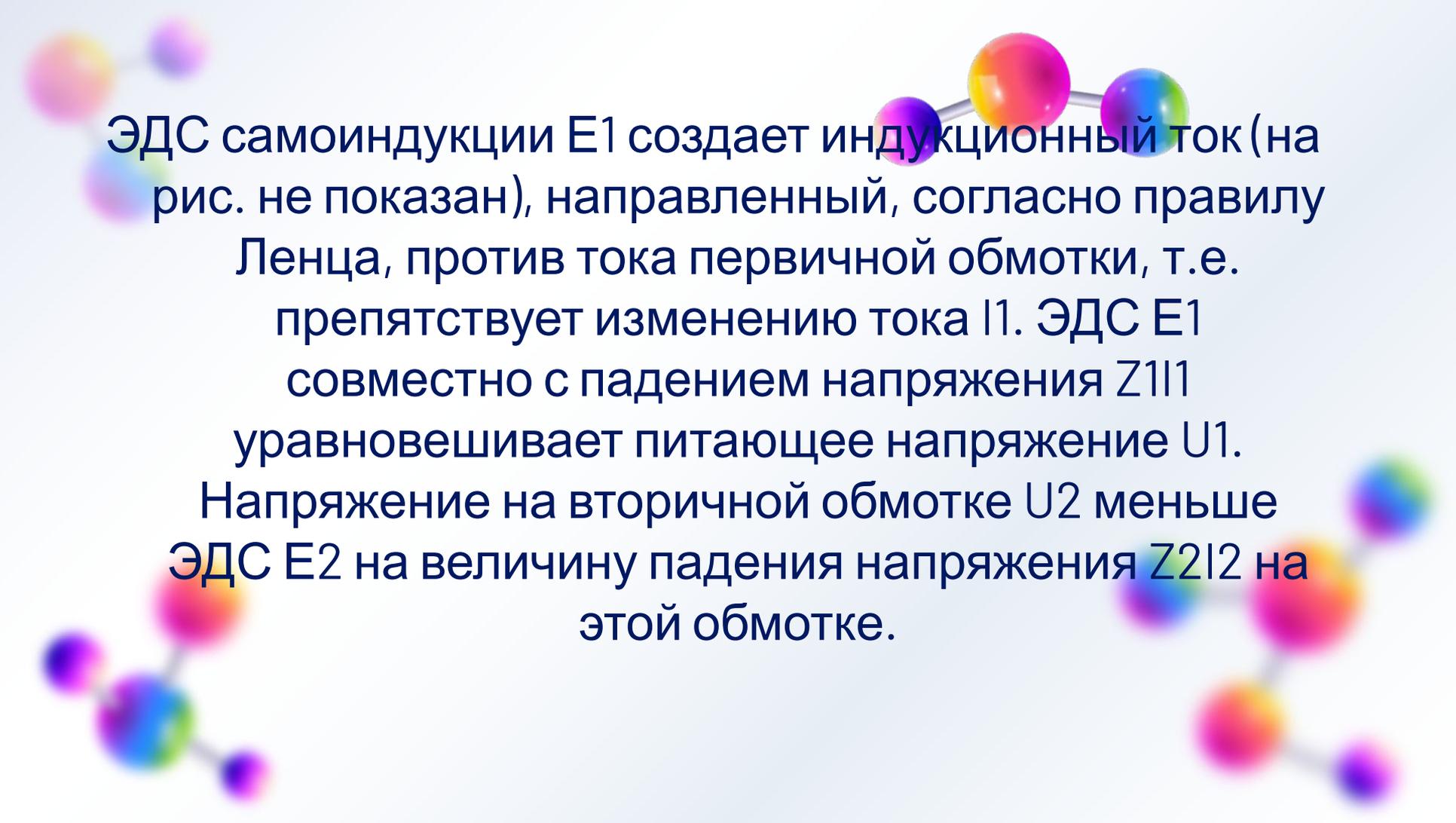
На рис. указаны условно положительные направления токов, магнитодвижущих сил (МДС) и магнитного потока трансформатора с учётом правила Ленца при заданных направлениях намотки и расположений обмоток.

Под действием напряжения, приложенного к первичной обмотке, в ней протекает ток I_1 , произведение $I_1 w_1$ является МДС первичной обмотки F_1 , а произведение $I_2 w_2$ – МДС вторичной обмотки F_2 . Результирующая МДС F_0 определяет величину основного переменного магнитного потока Φ_0 , замыкающегося по магнитопроводу.

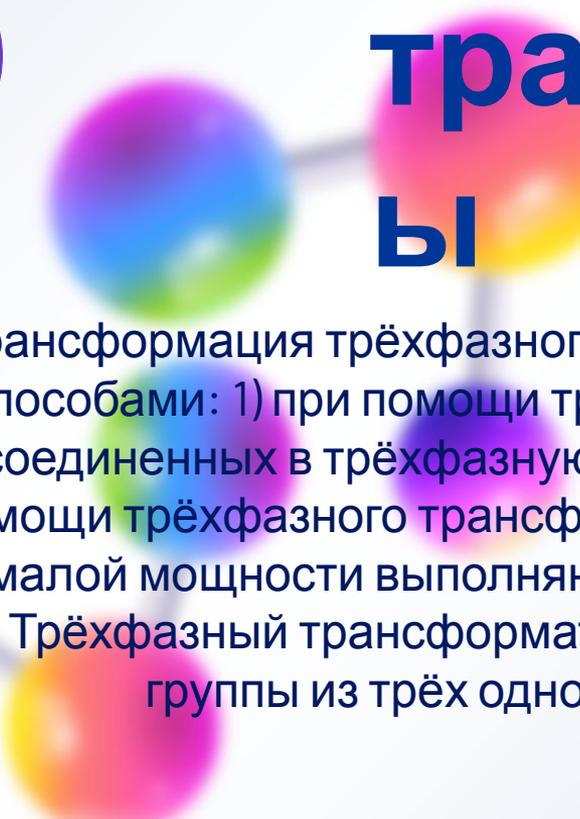


Помимо ЭДС, наводимых в обмотках основным переменным магнитным потоком Φ_0 в сердечнике, в них также наводятся ЭДС рассеяния E_S переменными магнитными потоками рассеяния Φ_S , замыкающимися по немагнитной среде (воздух, масло, медь и др.). Магнитные потоки рассеяния уменьшают степень электромагнитной связи обмоток, однако в связи с их малыми значениями относительно Φ_0 данными величинами и наводимыми ими ЭДС можно пренебречь. Коэффициент трансформации трансформатора находится как отношение действующего значения ЭДС обмотки высшего напряжения к действующему значению ЭДС обмотки низшего напряжения или как отношение числа витков обмоток





ЭДС самоиндукции E_1 создает индукционный ток (на рис. не показан), направленный, согласно правилу Ленца, против тока первичной обмотки, т.е. препятствует изменению тока I_1 . ЭДС E_1 совместно с падением напряжения $Z_1 I_1$ уравнивает питающее напряжение U_1 .
Напряжение на вторичной обмотке U_2 меньше ЭДС E_2 на величину падения напряжения $Z_2 I_2$ на этой обмотке.



02

Трёхфазные трансформатор ы

Трансформация трёхфазного тока может осуществляться двумя способами: 1) при помощи трёх однофазных трансформаторов, соединенных в трёхфазную трансформаторную группу; 2) при помощи трёхфазного трансформатора. Трансформаторы средней и малой мощности выполняются обычно с единым сердечником.

Трёхфазный трансформатор меньше по массе и габаритам группы из трёх однофазных трансформаторов.



25S

Обмотки трёхфазных трансформаторов принято соединять по следующим схемам: звезда (Y), звезда с нулевым выводом (YN), треугольник (Δ), зигзаг с нулевым выводом (ZN). Схемы соединения обмоток трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указана схема соединения обмоток ВН, а в знаменателе – обмоток НН. Например, Y/Δ означает, что обмотки ВН соединены в звезду, а обмотки НН – в треугольник.

23s

Отношение первичных и вторичных линейных напряжений холостого хода в трёхфазном трансформаторе определяется не только отношением чисел витков фазных обмоток, но и схемой их соединений.

Основными рабочими параметрами трансформатора являются:

- номинальные первичное и вторичное напряжения U_{1H} и U_{2H} ;
- номинальная полная мощность S_H ;
- ток и потери холостого хода I_{10} (P_{XX}) и P_{10} (P_{XX});
- напряжение и потери короткого замыкания $u_k\%$ и P_{1K} (P_{K3});
- коэффициент трансформации k ; • схема и группа соединений обмоток;
- коэффициент нагрузки трансформатора β ; • коэффициент полезного действия (КПД) η .

Номинальные параметры трансформатора

1

Номинальная мощность

Полная мощность, на которую непрерывно может загружаться трансформатор при нормальной температуре окружающей среды. У трехобмоточных трансформаторов мощности обмоток могут быть равными или различными, в таком случае номинальной мощностью считается наибольшая мощность обмотки.

2

Номинальное напряжение обмоток

Напряжения первичной и вторичной обмотки трансформатора при холостом ходе.
Коэффициент трансформации $n=U_{ВН}/U_{НН}$.

3

Номинальный ток трансформатора

Значение тока в обмотках трансформатора (указано в заводском паспорте), при котором допускается длительная нормальная работа.

4

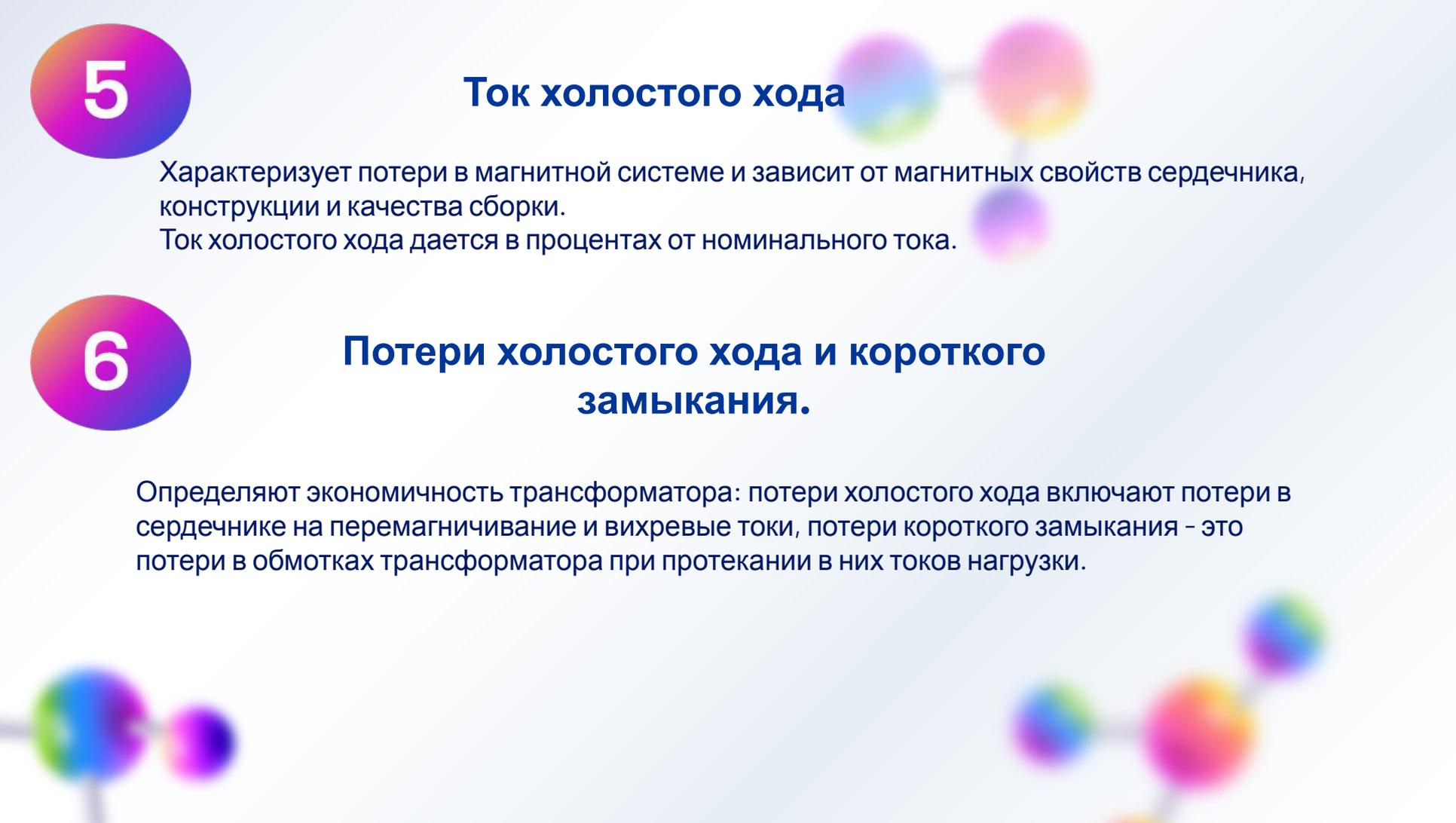
Напряжение короткого замыкания

Напряжение, при подаче которого на одну из обмоток трансформатора при замкнутой другой обмотке в ней протекает ток равный номинальному.

Напряжение короткого замыкания характеризует полное сопротивление трансформатора. Для трехобмоточных трансформаторов задаются УКВ-Н, УКВ-С и УКС-Н.

Так как индуктивное сопротивление много больше активного, то напряжение короткого замыкания определяется индуктивным сопротивлением.

Напряжение короткого замыкания дается в процентах от номинального.



5

Ток холостого хода

Характеризует потери в магнитной системе и зависит от магнитных свойств сердечника, конструкции и качества сборки.

Ток холостого хода дается в процентах от номинального тока.

6

Потери холостого хода и короткого замыкания.

Определяют экономичность трансформатора: потери холостого хода включают потери в сердечнике на перемагничивание и вихревые токи, потери короткого замыкания - это потери в обмотках трансформатора при протекании в них токов нагрузки.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Существует пять характерных режимов работы трансформатора:

1. Рабочий режим;
2. Номинальный режим;
3. Оптимальный режим;
4. Режим холостого хода;
5. Режим короткого замыкания;



1

Рабочий режим

Режим характеризуется следующими признаками:

- Напряжение первичной обмотки близко к номинальному значению или равно ему $u_1 \approx u_{1ном}$;
- Ток первичной обмотки меньше своего номинального значения или равен ему $i_1 \leq i_{1ном}$.

В рабочем режиме эксплуатируются большинство трансформаторов. Например, силовые трансформаторы работают с напряжениями и токами обмоток отличными от номинальных. Так происходит из-за переменчивого характера их нагрузки.

Измерительные, импульсные, сварочные, разделительные, выпрямительные, вольтодобавочные и другие трансформаторы, также обычно эксплуатируются в рабочем режиме просто из-за того, что напряжение сети к которой они подключены отличается от номинального.

2

НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Характерные признаки режима:

Напряжение первичной обмотки равно номинальному $u_1 = u_{1ном}$;

Ток первичной обмотки равен номинальному $i_1 = i_{1ном}$.

Номинальный режим работы является частным случаем рабочего режима. В таком режиме могут работать все трансформаторы, но как правило, с бóльшими в сравнении с рабочим режимом потерями и как следствие, с меньшим КПД (коэффициентом полезного действия). Из-за этого при эксплуатации трансформатора его избегают.

3

ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

Режим характеризуется условием:

$$k_{нг} = P_{хх} / P_{кз}$$

Где $P_{хх}$ - потери холостого хода;

$P_{кз}$ - потери короткого замыкания;

$k_{нг}$ - коэффициент нагрузки трансформатора, определяемый по формуле:

$$k_{нг} = I_2 / I_{2ном}$$

Где I_2 - ток нагрузки вторичной обмотки;

$I_{2ном}$ - номинальный ток вторичной обмотки.

В оптимальном режиме работы трансформатор работает с максимальным КПД, поэтому выражение (1) по существу представляет собой условие максимального.

4

РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

Характерные признаки режима:

Вторичная обмотка трансформатора разомкнута или к ней подключена нагрузка с сопротивлением гораздо большим сопротивления номинальной нагрузки обмотки(1) трансформатора;

К первичной обмотке приложено напряжение $u_1^x = u_1^н$ ном;

Ток вторичной обмотки $i_2 \approx 0$ (для трехфазного трансформатора - $i_2^ф \approx i_2^л \approx 0$).

На рисунке 1 изображена схема опыта холостого хода однофазного, а на рисунке 2 - трехфазного двухобмоточных трансформаторов.

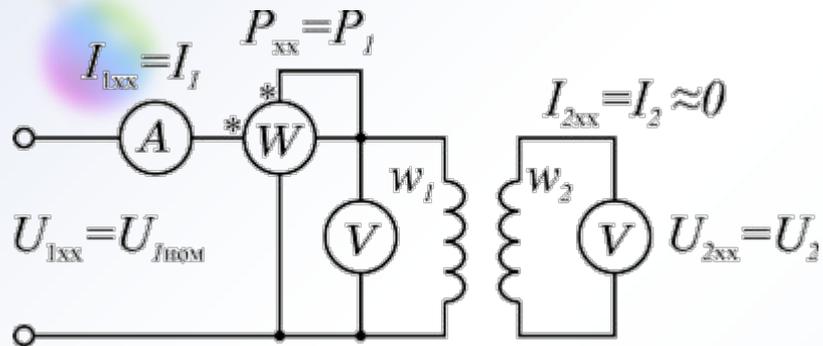


Рисунок 1 - Схема опыта холостого хода однофазного двухобмоточного трансформатора

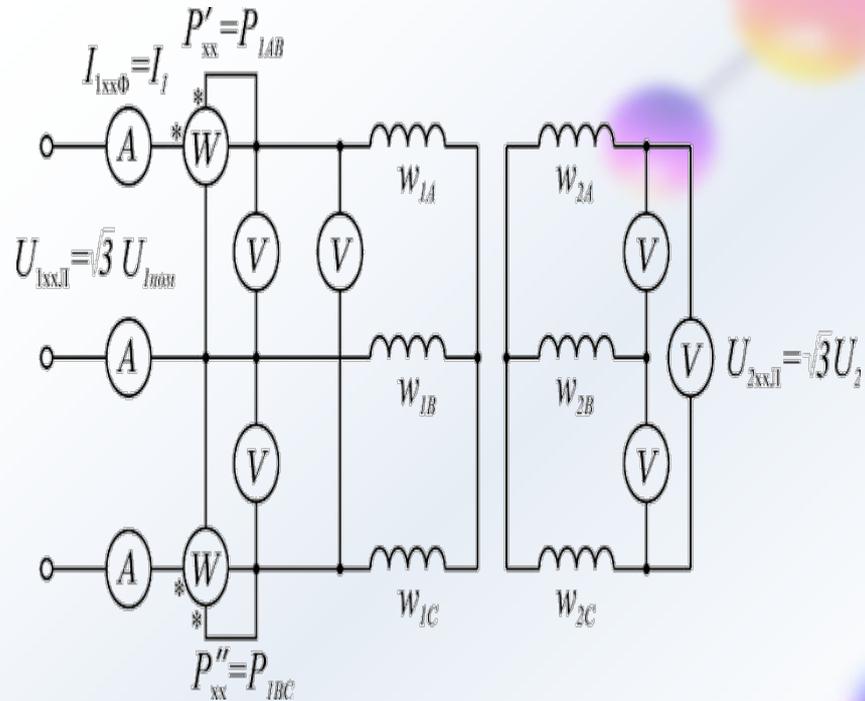


Рисунок 2 - Схема опыта холостого хода трехфазного двухобмоточного трансформатора

По существу в режиме холостого хода трансформатор представляет собой катушку на магнитопроводе, к которой подключен источник напряжения. Режим холостого хода является рабочим для трансформаторов напряжения. Кроме того, этот режим служит для определения тока i_x , мощности ΔQ_{xx} холостого хода и ряда других параметров.

Примечание:

Под сопротивлением номинальной нагрузки обмотки понимается величина $R_{Hном}$, равная отношению номинального напряжения обмотки $U_{ном}$ к её номинальному току обмотки $I_{ном}$

5

РЕЖИМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Режим короткого замыкания характеризуется:

Вторичная обмотка замкнута накоротко или к ней подключена нагрузка сопротивлением гораздо меньшим внутреннего сопротивления трансформатора;

К первичной обмотке приложена такая величина напряжения u_1 , что ток первичной обмотки равен её номинальному току $i_1 = i_{1ном}$

Напряжение вторичной обмотки $u_2 = 0$ (для трехфазного трансформатора - $u_{2ф} = u_{2л} = 0$)

Схема опыта короткого замыкания изображена на рисунке 3 для однофазного, а на рисунке 4 - для трехфазного двухобмоточных трансформаторов.

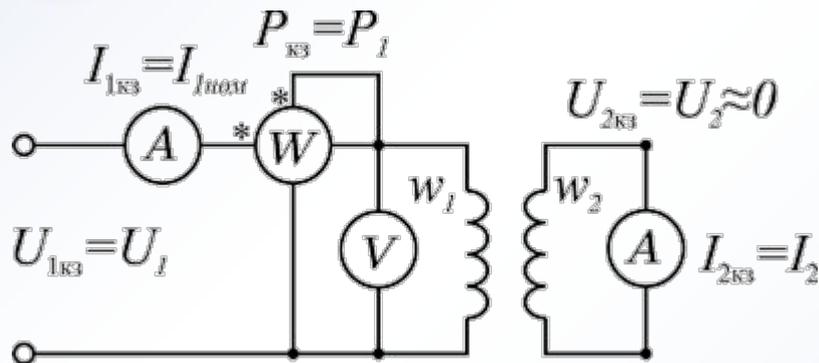


Рисунок 3 - Схема опыта короткого замыкания однофазного двухобмоточного трансформатора

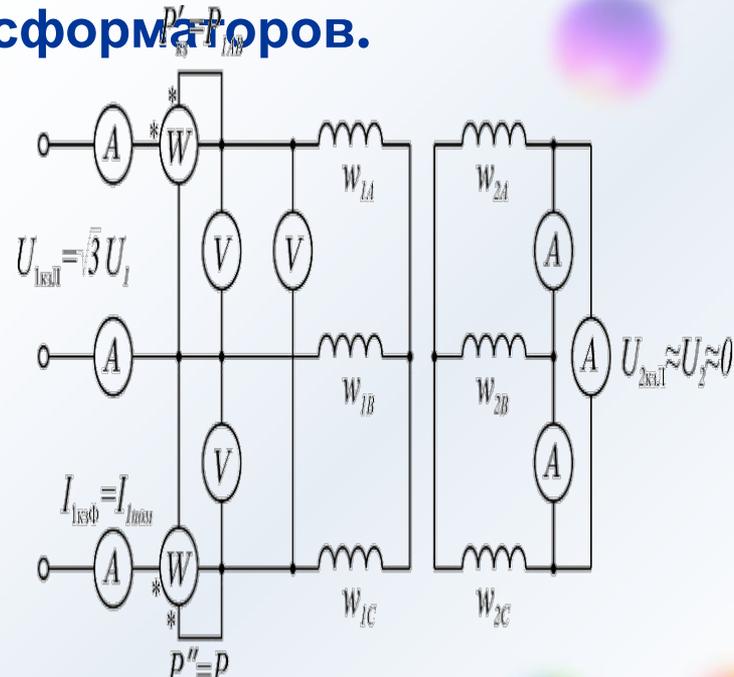
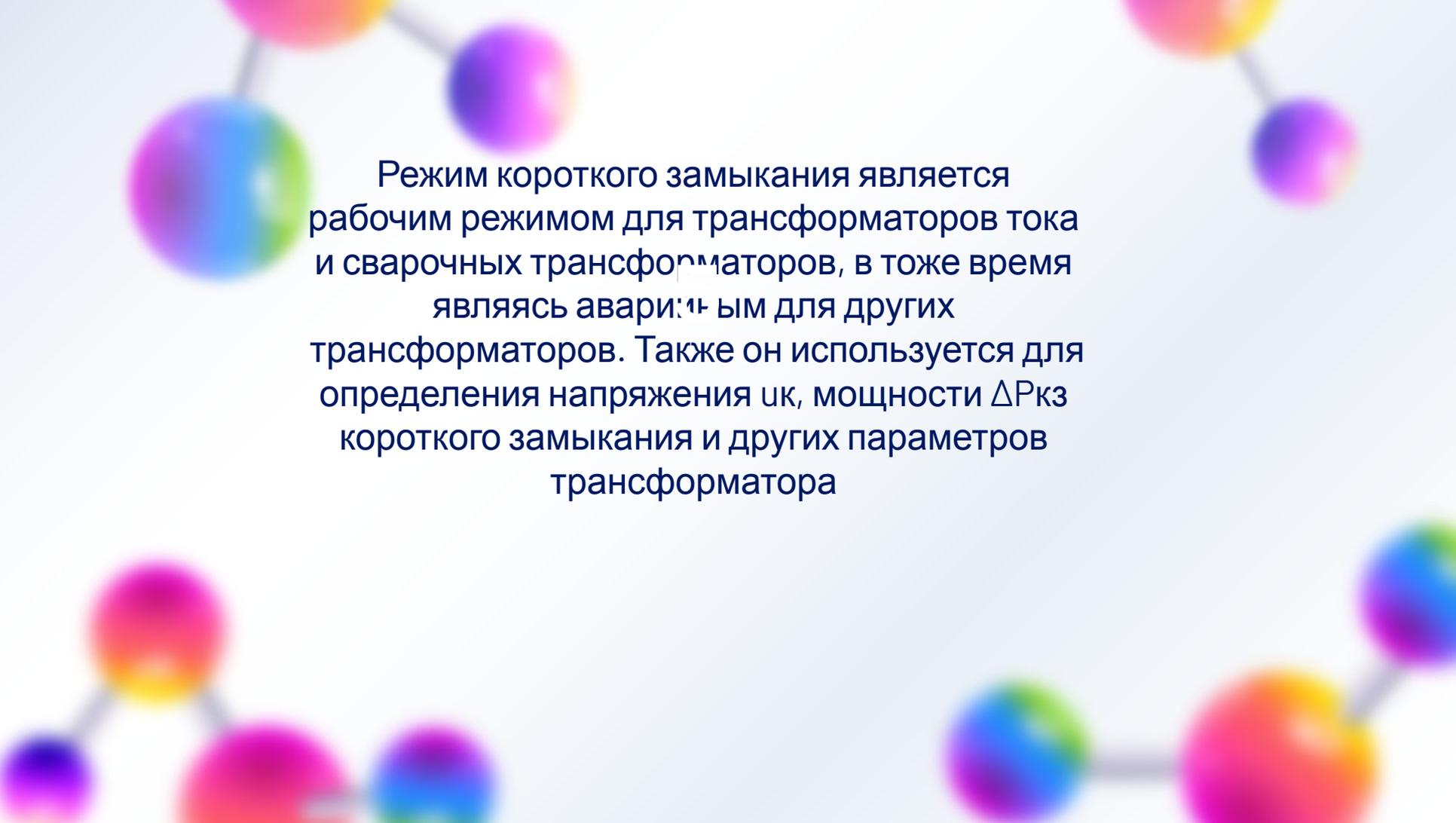


Рисунок 4 - Схема опыта короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора



Режим короткого замыкания является рабочим режимом для трансформаторов тока и сварочных трансформаторов, в тоже время являясь аварийным для других трансформаторов. Также он используется для определения напряжения ик, мощности $\Delta P_{кз}$ короткого замыкания и других параметров трансформатора

Основные характеристики трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора

Известно, что напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора зависит от тока нагрузки, подключенной к этой обмотке. Данная зависимость называется внешней характеристикой трансформатора.



1. Внешняя характеристика трансформатора снимается при постоянном напряжении питания, когда с изменением нагрузки, по сути - с изменением тока нагрузки, изменяется и напряжение на выводах вторичной обмотки, т. е. вторичное напряжение трансформатора.
2. Это явление объясняется тем, что на сопротивлении вторичной обмотки, с изменением сопротивления нагрузки, изменяется и падение напряжения, и за счет изменения падения напряжения на сопротивлении первичной обмотки, изменяется соответственно и ЭДС вторичной обмотки.
3. Поскольку уравнение равновесия ЭДС в первичной обмотке содержит векторные величины, напряжение на вторичной обмотке зависит и от тока нагрузки, и от характера этой нагрузки: активная ли она, индуктивная или емкостная.
4. О характере нагрузки свидетельствует величина угла сдвига фаз между током через нагрузку и напряжением на нагрузке. В целом, можно ввести коэффициент нагрузки, который покажет то, во сколько раз ток нагрузки отличается от номинального для данного трансформатора

$$\text{Коэффициент нагрузки } K_n = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \approx \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$$

1. Для точного расчета внешней характеристики трансформатора можно прибегнуть к схеме замещения, в которой, изменяя сопротивление нагрузки, фиксировать напряжение и ток вторичной обмотки.
2. Тем не менее, для практики полезной оказывается следующая формула, в которую подставляются напряжение холостого хода и «изменение вторичного напряжения», которое измеряется в процентах, и вычисляется как арифметическая разность между напряжением холостого хода и напряжением при данной нагрузке в процентах от напряжения холостого хода:

$$U_2 = U_{2_0} (1 - \Delta u / 100)$$

U_2 – вторичное напряжение при данной нагрузке

U_{2_0} – вторичное напряжение холостого хода

Δu – изменение вторичного напряжения

1. Выражение для нахождения «изменения вторичного напряжения» получают с определенными допущениями из схемы замещения трансформатора:

$$\Delta u = K_n (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \cos \varphi_2)$$

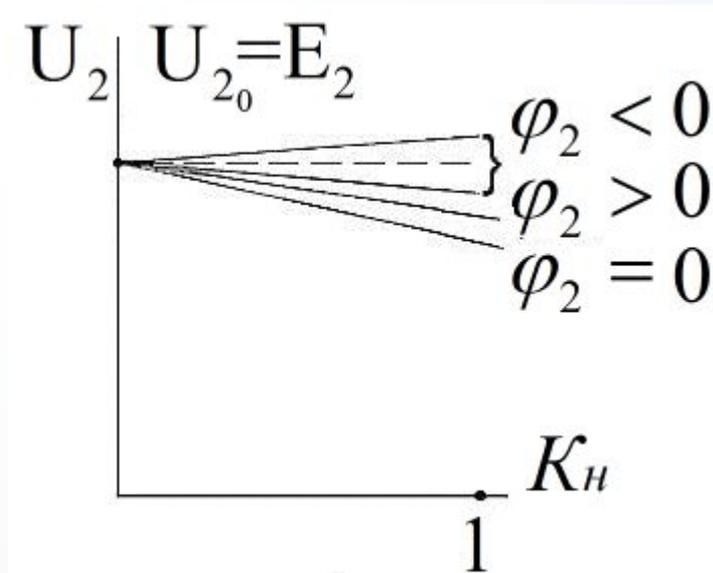
$u_{ка}$ – активная составляющая напряжения КЗ

$u_{кр}$ – реактивная составляющая напряжения КЗ

Здесь введены величины реактивной и активной составляющей напряжения короткого замыкания. Данные составляющие напряжения (активная и реактивная) находятся через параметры схемы замещения, либо находятся экспериментальным путем в опыте короткого замыкания.

Опыт короткого замыкания позволяет многое узнать о трансформаторе. Напряжение короткого замыкания находят как отношение напряжения короткого замыкания в эксперименте к номинальному первичному напряжению. Параметр «напряжение короткого замыкания» указывается в процентах.

1. В ходе эксперимента у трансформатора накоротко замыкают вторичную обмотку, при этом на первичную подают напряжение значительно ниже номинального, чтобы ток короткого замыкания оказался бы равным номиналу. Здесь напряжение питания уравнивается падениями напряжения на обмотках, и величину подводимого пониженного напряжения рассматривают как эквивалентное падение напряжения на обмотках при токе нагрузки равном номиналу.
2. Для маломощных трансформаторов питания и для силовых трансформаторов величина напряжения короткого замыкания лежит в пределах от 5% до 15%, и чем мощнее трансформатор – тем меньше эта величина. Точное значение напряжения короткого замыкания приводится в технической документации на конкретный трансформатор.



1. На рисунке приведены внешние характеристики, построенные в соответствии с приведенными выше формулами. Видим, что графики линейны, это потому, что вторичное напряжение не сильно зависит от коэффициента нагрузки в силу относительно малого сопротивления провода обмоток, а рабочий магнитный поток мало зависит от нагрузки.

$$u_{ка} = 100\% I_{1ном} (R_1 - R_2') / U_{1ном}$$

$$u_{кр} = 100\% I_{1ном} (X_1 - X_2') / U_{1ном}$$

На рисунке видно, что угол сдвига фаз в зависимости от характера нагрузки влияет на то, падающей или возрастающей получается характеристика. При нагрузке активной или активно-индуктивной — характеристика падающая, при активно-емкостной — может быть возрастающей, и тогда второй член в формуле для «изменения напряжения» становится отрицательным.

1. Для маломощных трансформаторов на активной составляющей обычно падает больше, чем на индуктивной, поэтому внешняя характеристика при активной нагрузке менее линейная, чем при нагрузке активно-индуктивного характера. Для более мощных трансформаторов – все наоборот, поэтому и характеристика для нагрузки активного характера окажется более жесткой.

КПД трансформатора

1. Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение отдаваемой в нагрузку полезной электрической мощности к потребляемой трансформатором активной электрической мощности

$$\underline{\eta = P_2 / P_1}$$

Потребляемая трансформатором мощность складывается из мощности потребляемой нагрузкой и мощности потерь непосредственно в трансформаторе. При том активная мощность соотносится с полной мощностью следующим образом:

$$P_2 = S_2 \cos\varphi_2$$

Так как на выходе трансформатора напряжение в целом слабо зависит от нагрузки, то коэффициент нагрузки может быть связан с номинальной полной мощностью так:

$$K_n = I_2 / I_{2\text{ном}} \approx S_2 / S_{\text{ном}}$$

1. И мощность, потребляемая нагрузкой во вторичной цепи:

$$P_2 = K_n S_{\text{НОМ}} \cos\varphi_2$$

Электрические потери в нагрузке произвольной величины могут быть выражены с учетом потерь при номинальной нагрузке через коэффициент нагрузки:

$$\underline{\Delta P_{\text{э}} = K_n^2 \Delta P_{\text{эНОМ}}}$$

$\Delta P_{\text{э}}$ – электрические потери

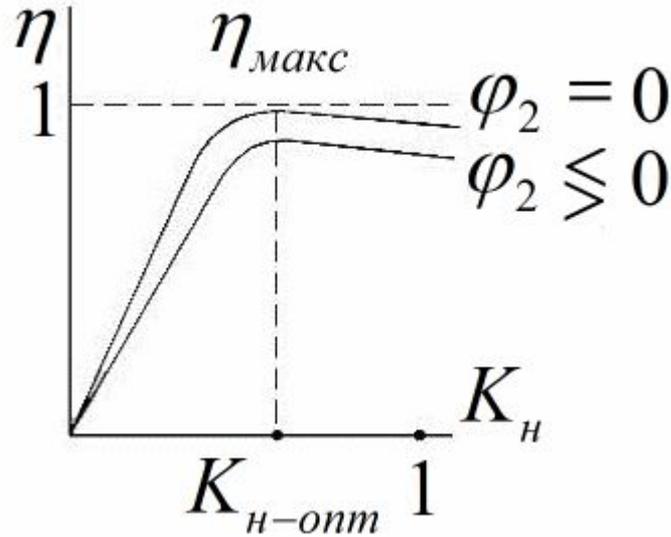
$\Delta P_{\text{эНОМ}}$ – номинальные электрические потери

Потери при номинальной нагрузке достаточно точно определяются мощностью, которую трансформатор потребляет в эксперименте короткого замыкания, а потери магнитного характера равны мощности, потребляемой трансформатором на холостом ходу. Эти составляющие потерь приводятся в документации на трансформаторы. Так, если учесть приведенные факты, формула для КПД примет следующий вид:

$$\underline{\eta = \frac{K_n S_{\text{НОМ}} \cos\varphi_2}{K_n S_{\text{НОМ}} \cos\varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k}}$$

P_k – мощность, потребляемая в опыте КЗ

1. На рисунке приведены зависимости КПД трансформатора от нагрузки. При нагрузке равной нулю – КПД равен нулю.



С ростом коэффициента нагрузки возрастает и отдаваемая в нагрузку мощность, причем магнитные потери неизменны, и КПД, легко видеть, линейно растет. Далее наступает оптимальное значение коэффициента нагрузки, при котором КПД достигает своего предела, в этой точке получается максимальный КПД.

1. После прохождения оптимального коэффициента нагрузки КПД начинает постепенно снижаться. Это происходит потому, что растут электрические потери, они пропорциональны квадрату тока и, соответственно, квадрату коэффициента нагрузки. Максимум КПД для мощных трансформаторов (мощность измеряется в единицах и более КВА) лежит в пределах от 98% до 99%, у маломощных (менее 10 ВА) – КПД может быть около 60%.
2. Как правило, трансформаторы еще на стадии проектирования стараются сделать такими, чтобы КПД достигал максимального значения при оптимальном коэффициенте нагрузки от 0,5 до 0,7, тогда при реальном коэффициенте нагрузки от 0,5 до 1, КПД окажется близок к своему максимуму. С уменьшением коэффициента мощности (косинуса ϕ) нагрузки, присоединенной ко вторичной обмотке, уменьшается и отдаваемая мощность, причем электрические и магнитные потери остаются неизменными, следовательно КПД в этом случае падает.
3. Оптимальный режим работы трансформатора, т. е. его номинальный режим, обычно устанавливают по условиям безаварийной работы и по уровню допустимого нагрева за время определенного эксплуатационного периода. Это крайне важное условие, чтобы трансформатор отдавая номинальную мощность, работая в номинальном режиме, не перегревался бы сверх меры.

Схемы и группы соединений обмоток трансформаторов

Схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов

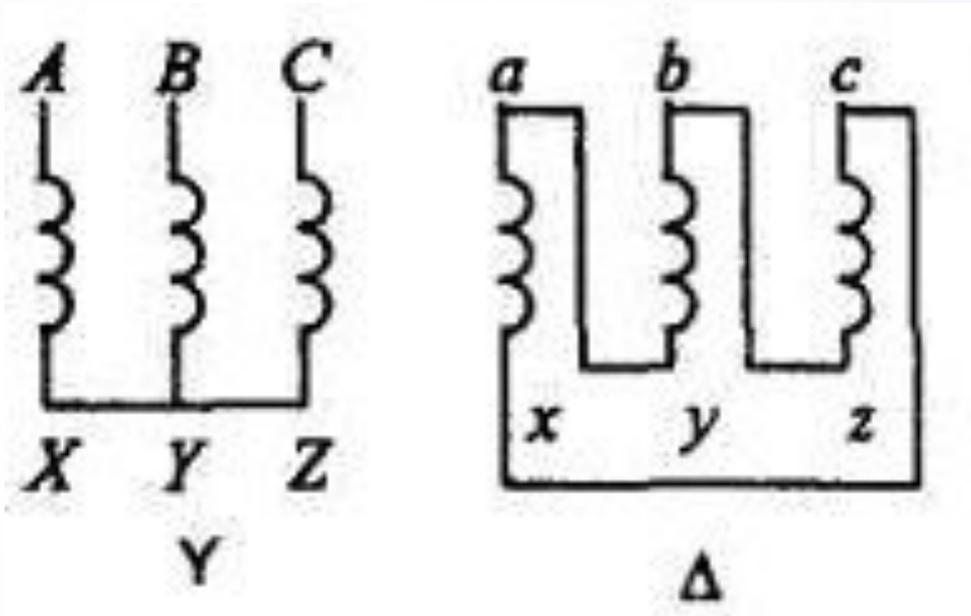
Трехфазный трансформатор имеет две трехфазные обмотки - высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения, в каждую из которых входят по три фазные обмотки, или фазы. Таким образом, трехфазный трансформатор имеет шесть независимых фазных обмоток и 12 выводов с соответствующими зажимами, причем начальные выводы фаз обмотки высшего напряжения обозначают буквами А, В, С, конечные выводы - X, Y, Z, а для аналогичных выводов фаз обмотки низшего напряжения применяют такие обозначения: a,b,c,x,y,z.

Каждая из обмоток трехфазного трансформатора — первичная и вторичная — может быть соединена тремя различными способами, а именно:

- звездой;
- треугольником;
- зигзагом.

В большинстве случаев обмотки трехфазных трансформаторов соединяют либо в звезду, либо в треугольник (рис. 1).

Выбор схемы соединений зависит от условий работы трансформатора. Например, в сетях с напряжением 35 кВ и более выгодно соединять обмотки в звезду и заземлять нулевую точку, так как при этом напряжение проводов линии передачи будет в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, что приводит к снижению стоимости изоляции.



Условные обозначения и расшифровка

Группы маркируются числами от 0 до 11. Для удобства и стандартизации принято следующее:

однотипные соединения (Δ/Δ , Y/Y) имеют четные номера;
разнотипные соединения (Δ/Y , Y/Δ) – нечетные.

Трехфазные трансформаторы выполняются на стержневых магнитопроводах. Каждая из фаз располагается на отдельном стержне. Это во многом упрощает дальнейшую работу и согласование устройств между собой.

Если у трансформатора одинаковые фазы намотаны на одних стержнях, то группы соединений при этом называются основными (0, 6, 11, 5). Остальные группы – производные.

Приняты следующие обозначения на электросхемах и устройствах:

Y, Y – звезда;

Y_n, Y_n – звезда на стороне низкого напряжения;

Y_0, Y_0 – звезда с нулевой точкой;

Δ, Δ, Δ – треугольник;

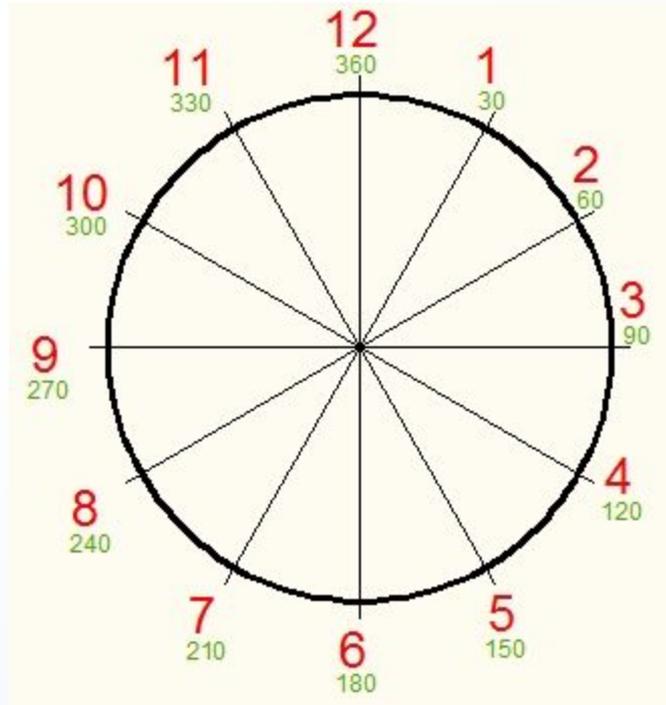
$\Delta_n, \Delta_n, \Delta_n$ – треугольник на стороне низкого напряжения.

Группы соединений обмоток трансформатора

Обмотки низкого, среднего и высокого напряжения трансформаторов могут соединяться по-разному – в треугольник, звезду, реже зигзаг, образуя схему соединения обмоток трансформатора.

Схема соединения – это сочетание схем соединения обмоток высшего и низшего напряжения для двухобмоточного трансформатора или обмоток высшего, среднего и низшего для трехобмоточного трансформатора. Однако, несмотря на различное соединение обмоток, схемы могут давать одинаковый сдвиг между одноименными векторами напряжения. Несколько схем, дающих одинаковый по величине угол сдвига фаз, образуют группу соединения.

Основных групп может быть 12. Для удобства представляют циферблат стрелочных часов. Каждой группе соответствует угол кратный 30 градусам от 0 до 360 градусов. Они отмечаются на циферблате часов, через один час, каждому часу соответствует сдвиг в 30 градусов. 360 градусов – 12 часов.



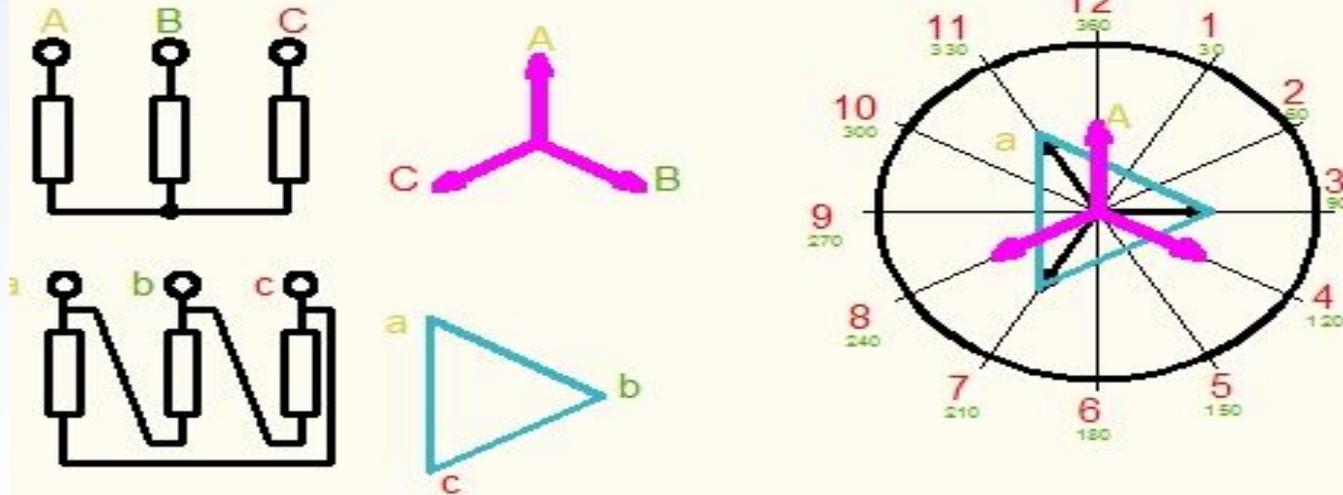
Групп 12 и имеется следующая закономерность – четные группы (2,4,6,8,10,12) образуются, если с высокой и низкой стороны одинаковое соединение (треугольник-треугольник, звезда-звезда). Нечетные группы (1,3,5,7,9,11) образуются, если с высокой и низкой сторон различное соединение (треугольник-звезда).

В ГОСТ 30830-2002 пишется, что вектор фазы А ВН откладывается параллельно и сонаправленно стрелке на 12 часов. Порядок фаз идет А-В-С, движение векторов на циферблате осуществляется против часовой стрелки.

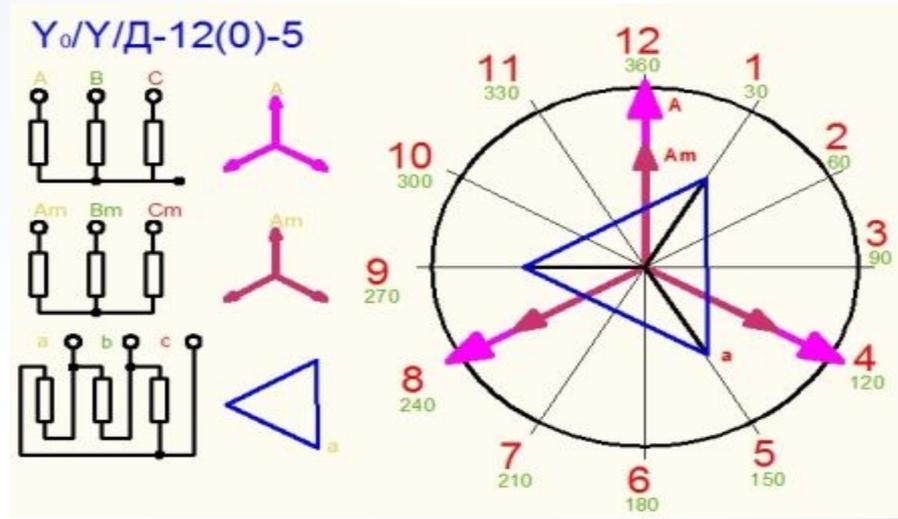
Чтобы построить треугольник, сначала надо построить звезду, а потом вписать ее в треугольник.

Вот, например, двухобмоточный трехфазный трансформатор со схемой Y/Д-11, для примера. Где Y-значит звезда с высокой стороны, Д-треугольник с низкой стороны, между ними угол 360 градусов.

Y/Д-11



Если трансформатор трехобмоточный, то может быть (возьмем ради примера) Y0/Y/Д-12-5. Все как и в прошлом примере, только добавилась обмотка среднего напряжения. В этом примере обмотка ВН – звезда с нулем, СН – звезда, НН – треугольник. Сдвиг между обмотками ВН и СН – 12 часов, между ВН и НН – 11 часов (или 0 часов). Между СН и НН – 11 часов, про это писалось выше.



Существуют определенные действия с выводами обмоток, выполнив которые, можно добиться определенного результата группами трансформаторов.

если по-порядку циклически перемаркировать фазы А-В-С(а-б-с) на В-С-А(б-с-а), то группа изменится на 4 (как в большую, так и в меньшую сторону)

двойная перемаркировка двух фаз, на стороне ВН и НН, изменяют нечетную группу на плюс минус 2

если поменять местами две фазы на одной из сторон (ВН или НН), то трансформатор потеряет группу и его запрещено будет включать на параллельную работу с другим трансформатором

Схемы групп соединения обмоток 3ф. 2обм. трансформаторов

Существует огромное множество схем соединения обмоток, некоторые из них образуют группы соединения трансформаторов. Рассмотрим некоторые из них, а именно схемы со звездой и треугольником с группами от 1 до 12.

Также схематично представим обозначения вводов на крышке трансформатора и векторные диаграммы.

12 группа (Y/Y-12, Д/Д-12)

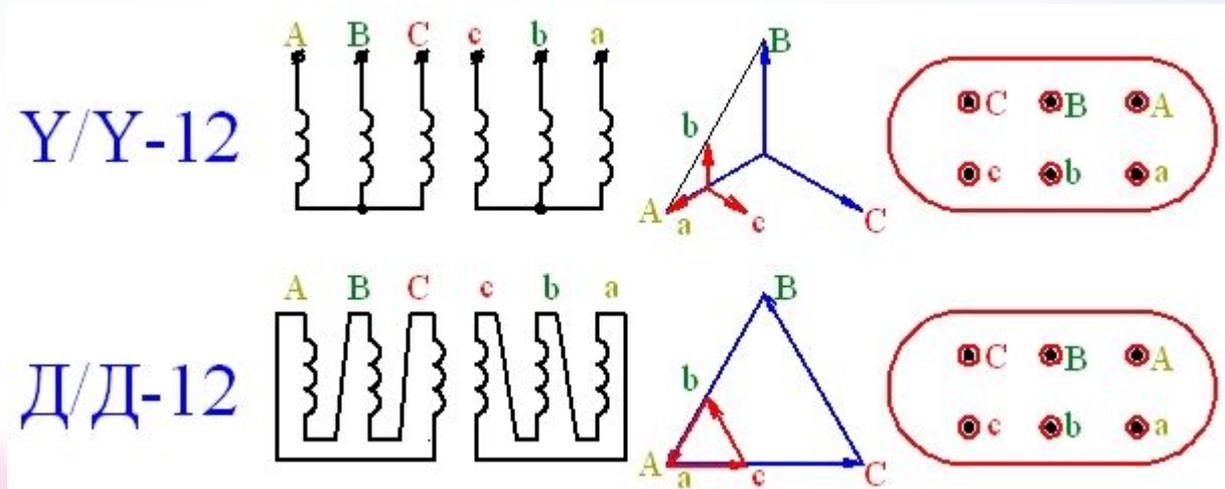


Рисунок 1 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 12

11 группа (Y/Д-11,
Д/Y-11)

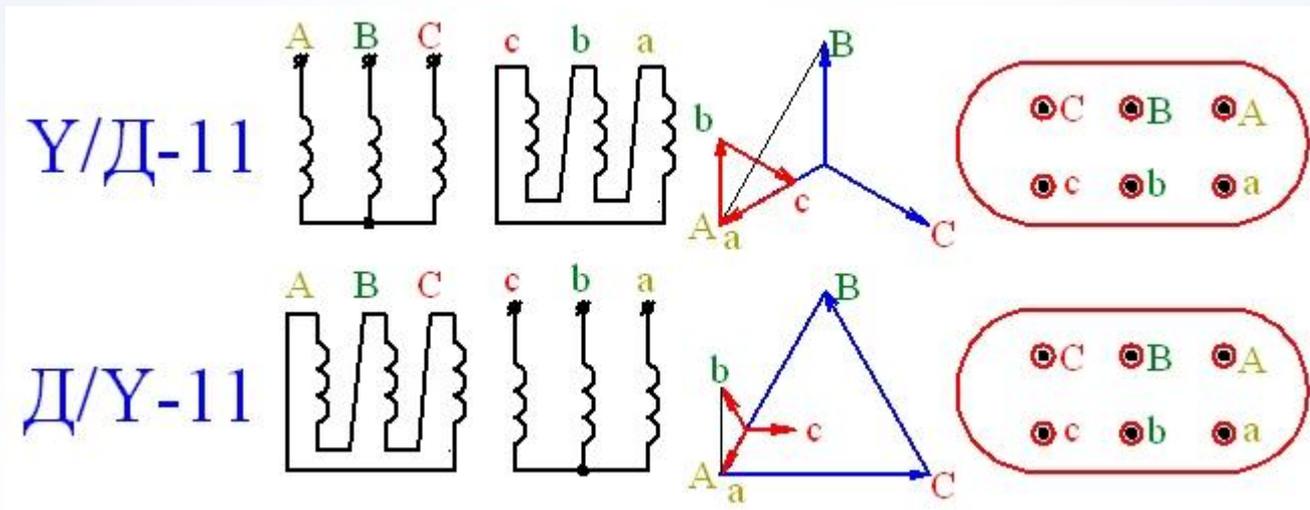


Рисунок 2 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 11

10 группа (Д/Д-10,
Y/Y-10)

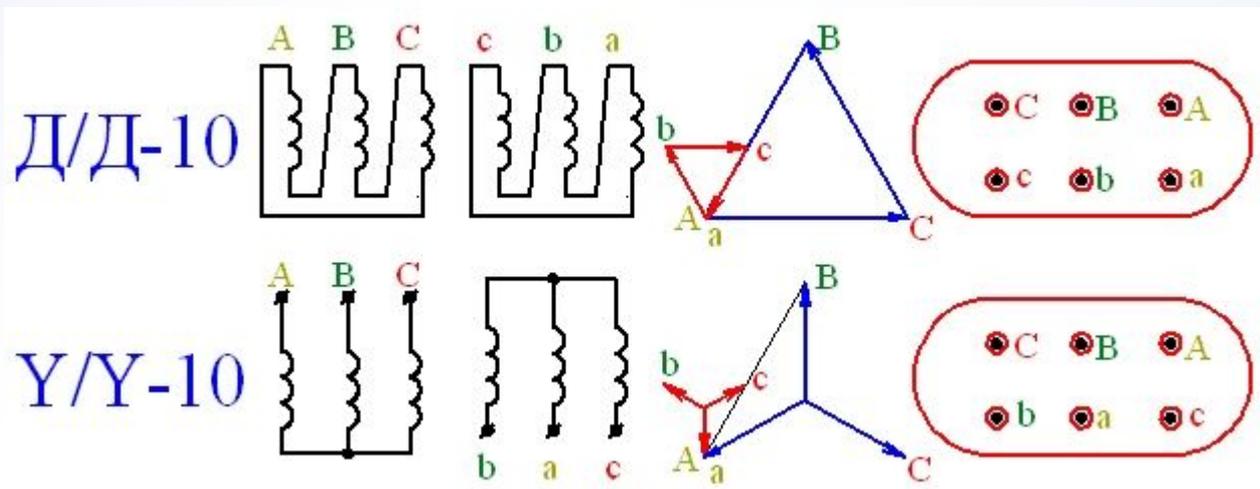


Рисунок 3 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 10

9 группа (Y/Д-9,
Д/Y-9)

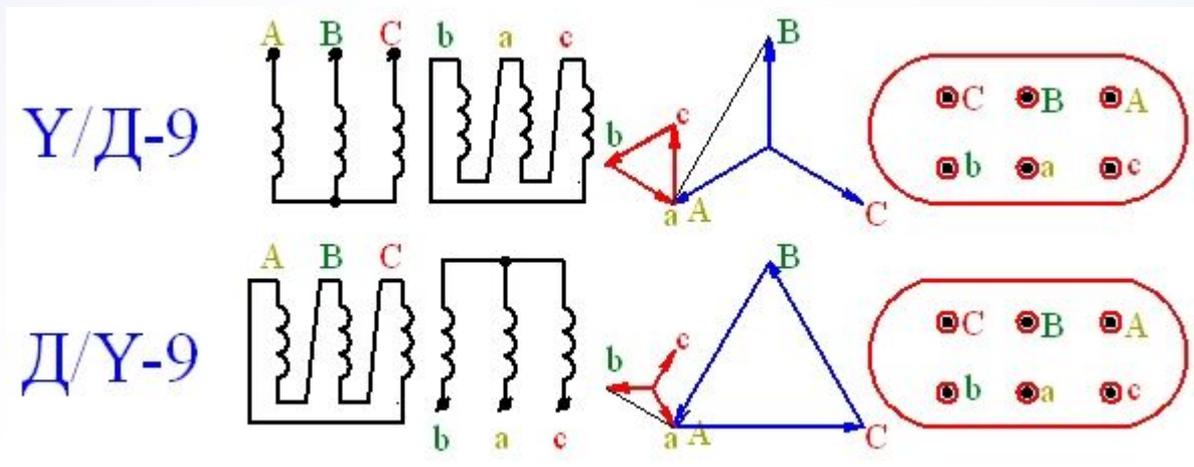


Рисунок 4 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 9

8 группа (Y/Y-8, Д/Д-8)

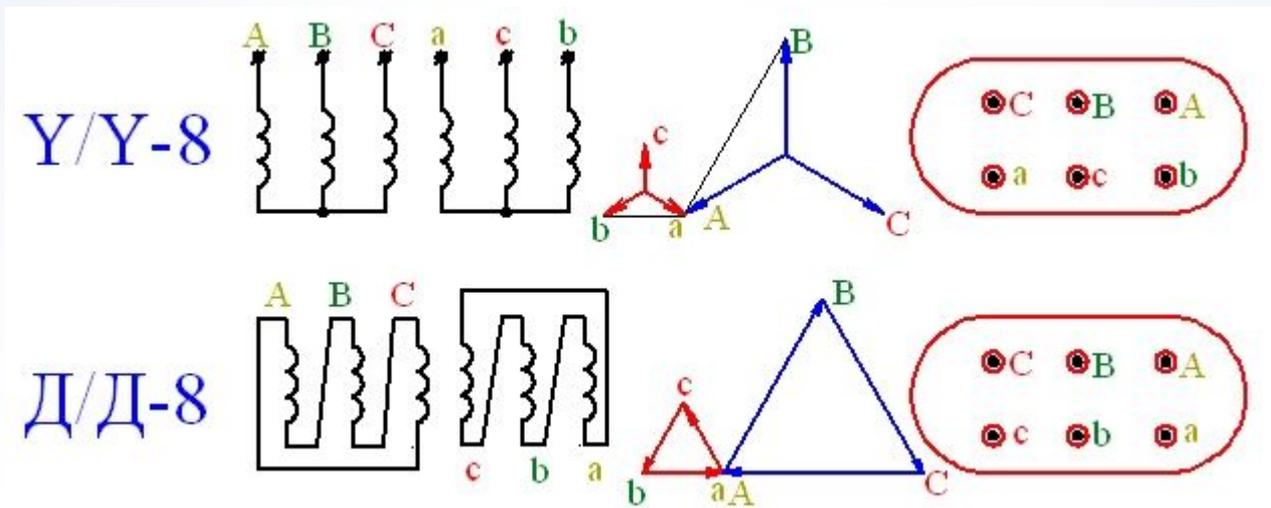


Рисунок 5 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 8

7 группа (Y/Д-7,
Д/Y-7)

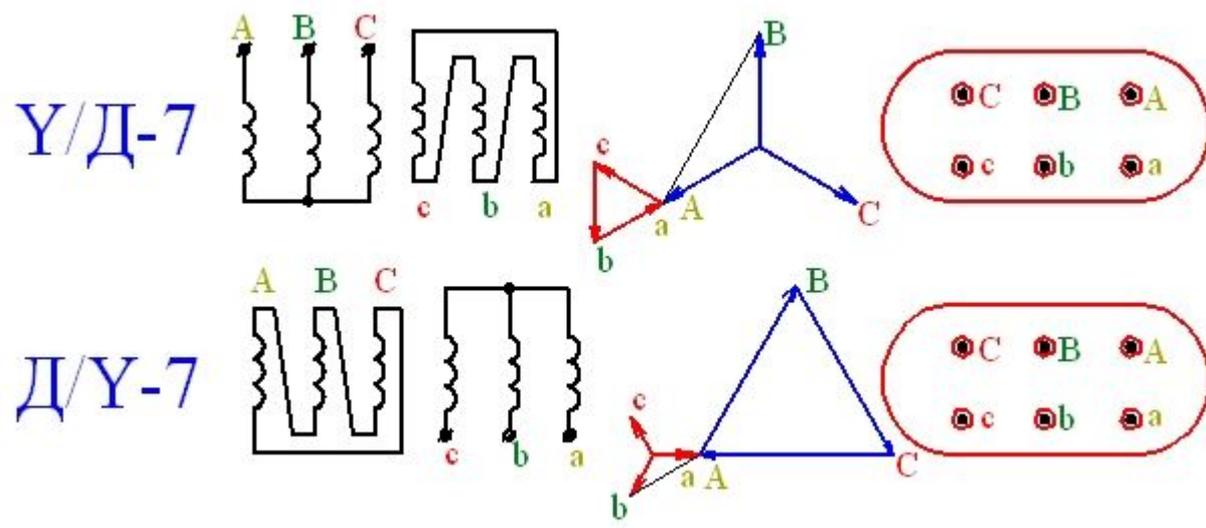


Рисунок 6 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 7

6 группа (Y/Y-6, Д/Д-6)

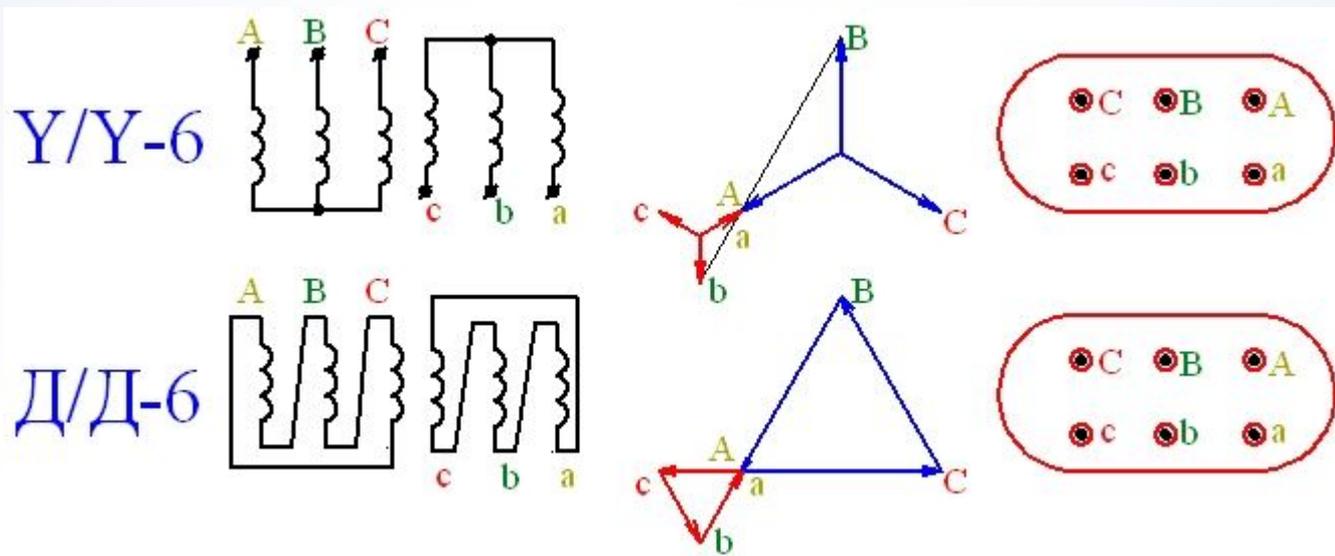


Рисунок 7 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 6

5 группа (Y/Д-5,
Д/Y-5)

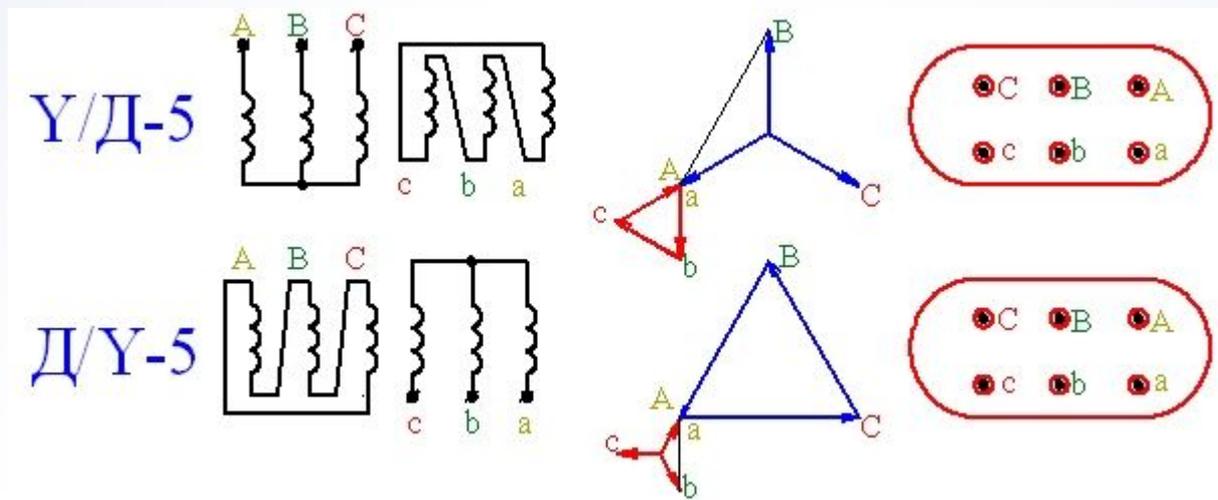


Рисунок 8 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 5

4 группа (Y/Y-4, Д/Д-4)

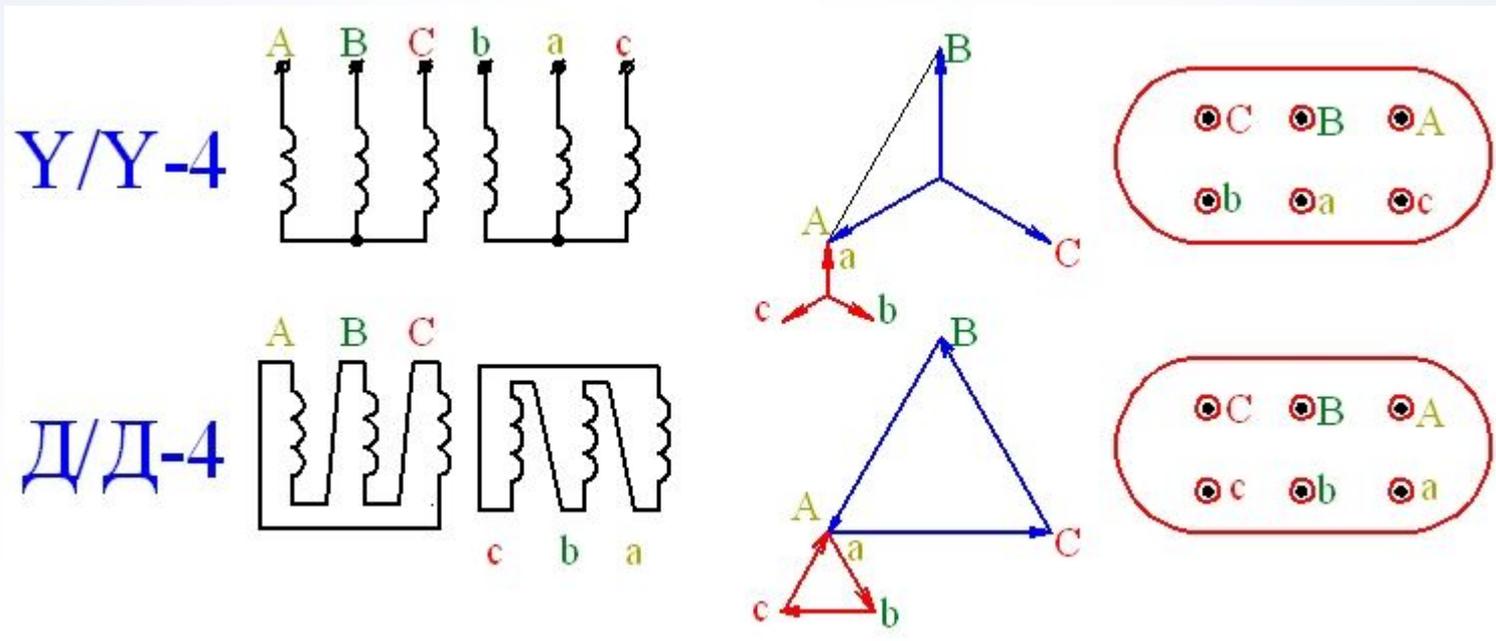
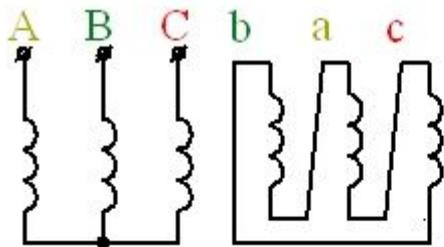


Рисунок 9 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 4

3 группа (Y/Д-3,
Д/Y-3)

Y/Д-3



Д/Y-3

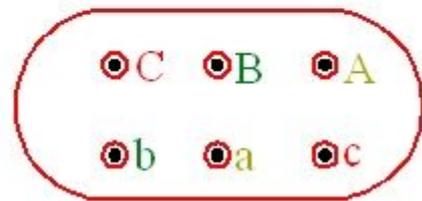
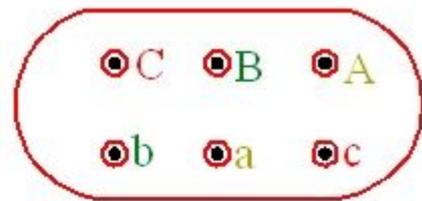
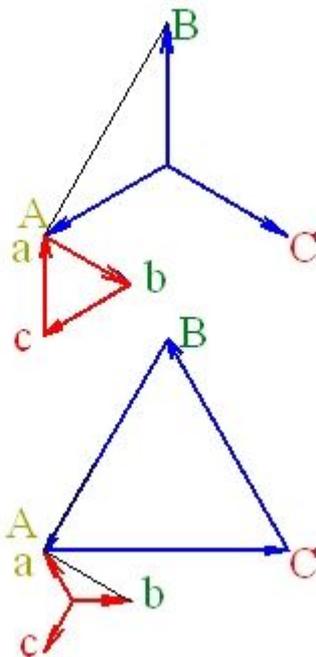
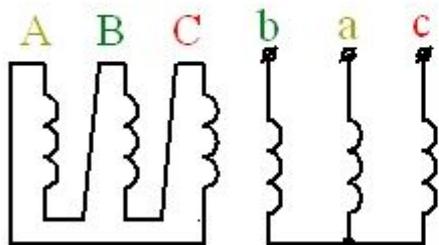


Рисунок 10 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 3

2 группа (Y/Y-2, Д/Д-2)

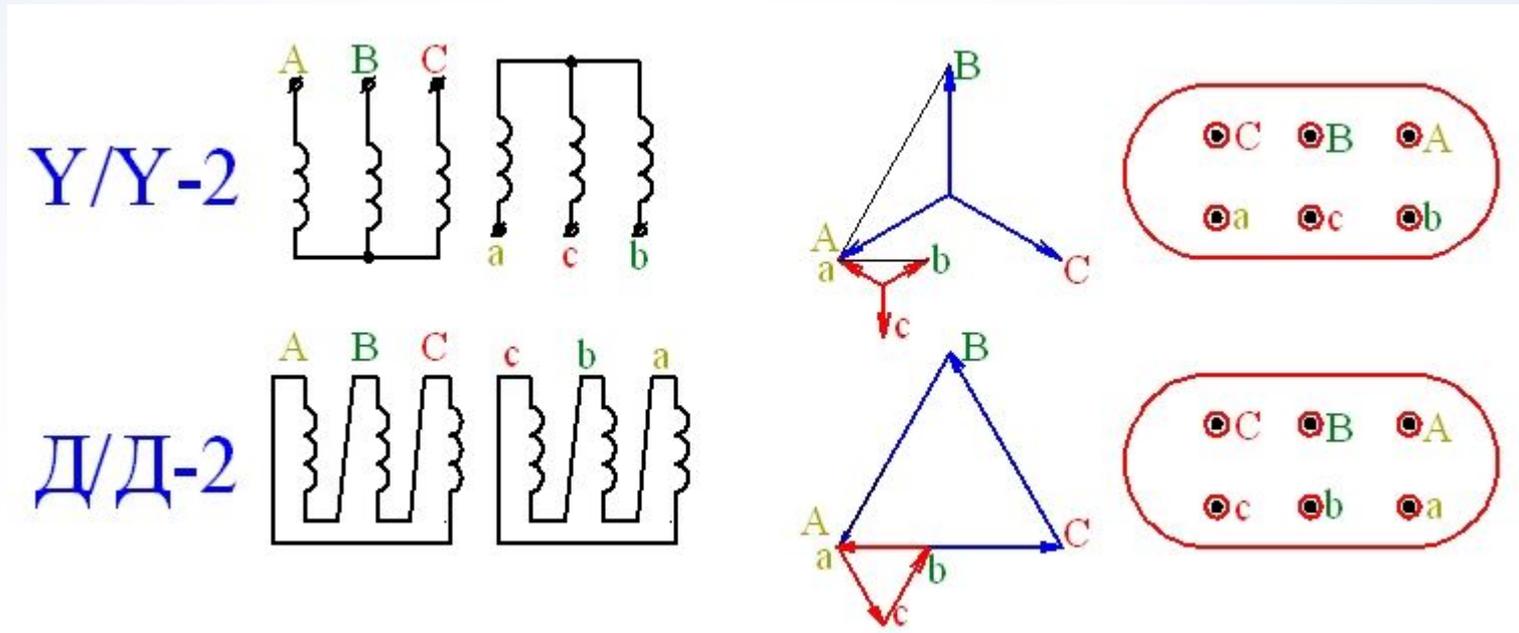


Рисунок 11 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 2

1 группа (Y/Д-1,
Д/Y-1)

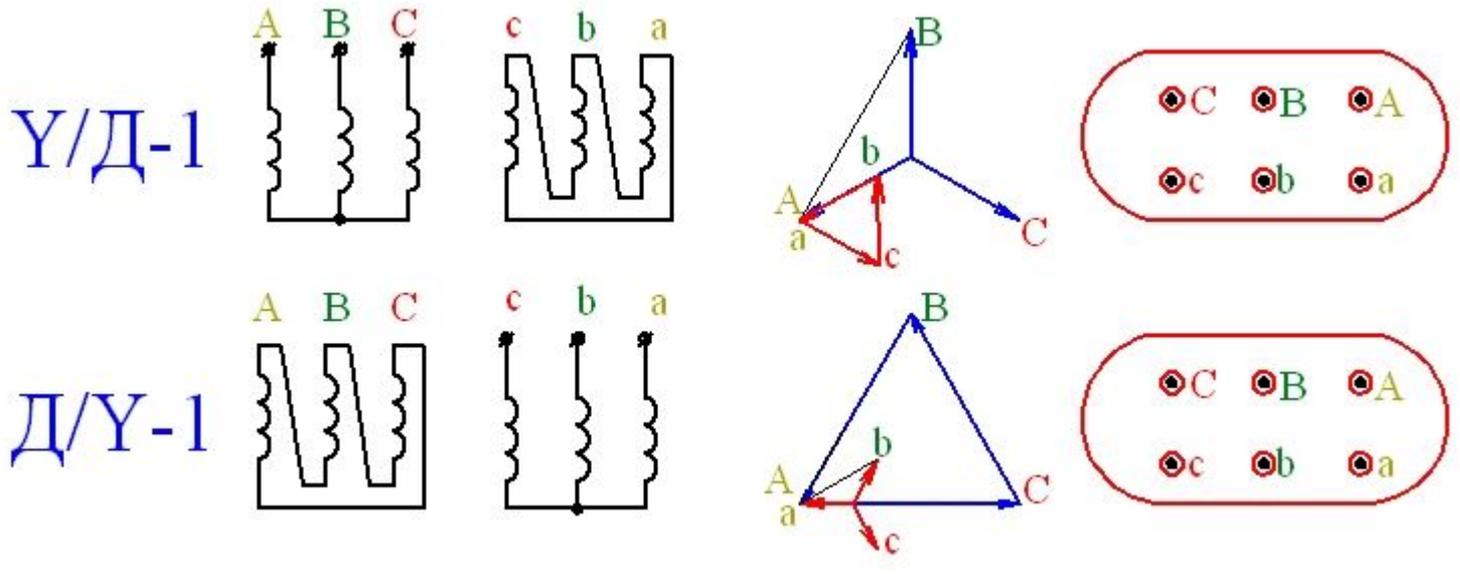


Рисунок 12 – схема соединения обмоток, векторная диаграмма и расположение выводов на крышке трансформатора для схем группы 1

Укажем некоторые особенности отдельных схем:

Схема $Y0/Y-12$ получается из схемы $Y/Y-12$ соединением нулевого ввода трансформатора с нейтралью звезды;

Схема $Д/Д-12$ – обе обмотки выполнены левыми, если же одну из обмоток выполнить правой, то выйдет схема $Д/Д-6$.

Схема $Д/Д-10$ – обе обмотки левые, если одну из обмоток выполнить правой, то получится схема $Д/Д-4$;

Схему $Д/Д-8$ можно получить, если в схеме $Д/Д-2$ одну из обмоток выполнить правой.

Схему $Y/Д-5$ можно получить, если в схеме $Y/Д-11$ одну из обмоток выполнить правой, а вторую левой.

Далеко не все из представленных схем широко распространены, однако, их знание не будет лишним.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

При работе трансформаторов происходит нагрев обмоток и магнитопровода за счёт потерь энергии в них. Предельный нагрев частей трансформатора ограничивается изоляцией, срок службы которой зависит от температуры нагрева. Чем больше мощность трансформатора, тем интенсивней должна быть система охлаждения.

Система охлаждения трансформатора – система, которая предназначена для интенсификации теплообмена между окружающей средой (теплоносителем) и активной частью трансформатора. В зависимости от конструктивных особенностей и используемого теплоносителя, различают несколько основных систем охлаждения:

Естественное воздушное охлаждение (С)

Естественное воздушное (С). Представляет собой прямой теплообмен между нагретой активной частью и окружающим воздухом. Осуществляется путём естественной циркуляцией воздуха, такие трансформаторы называются сухими.

Буква С в маркировке показывает, что силовой трансформатор сухой – то есть в нем не предусмотрено использование трансформаторного масла для охлаждения. В данном случае обмотки и магнитопровод трансформатора охлаждаются естественной циркуляцией воздуха. Существуют модификации данной системы охлаждения: СГ – герметичное исполнение, СЗ – защищенный корпус.

Возможно наличие принудительной циркуляции воздуха на корпус трансформатора – это охлаждение системы СД.

Системы охлаждения С и их модификации характеризуются низкой эффективностью, поэтому применяются на трансформаторах малой мощности, как правило, до 1,6 МВ*А класса напряжения 6 и 10 кВ.

На трансформаторы данной системы охлаждения монтируются датчики температуры для возможности контроля температуры по каждой из фаз трансформатора.

Допустимое превышение температуры обмотки сухого трансформатора зависит от класса нагревостойкости изоляции. Для класса А $t-60^{\circ}\text{C}$, класс Е- 75°C , класс В- 80°C , класс F- 100°C , класс Н- 125°C .

Естественное масляное (М).

Его используют для трансформаторов ТМ, ТМН, ТМГ с мощностью до 20 000 кВА и напряжением до 110 кВ. Тепло от магнитопровода и обмоток посредством минерального масла передается на корпус бака и радиаторов, где происходит интенсивное охлаждение окружающим воздухом.

Более мощные трансформаторы требуют более производительной системы охлаждения – масляной. Масло обеспечивает более эффективный отвод тепла от обмоток и магнитной системы трансформатора, обеспечивая их равномерное охлаждение.

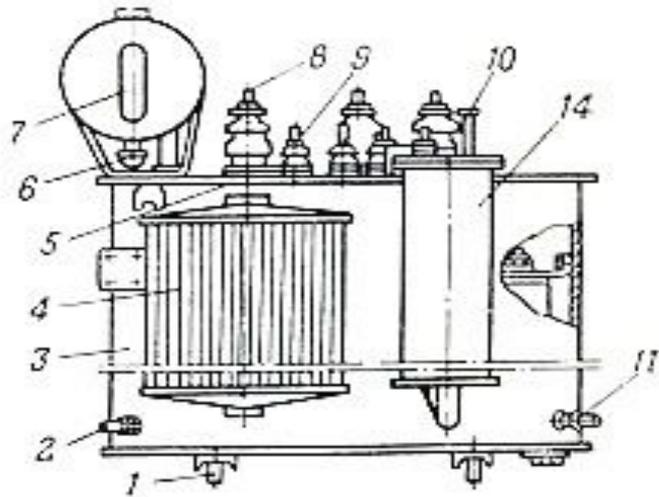
Система охлаждения М предусматривает естественную циркуляцию масла в баке трансформатора. Тепло масла передается баку трансформатора, который охлаждается окружающим воздухом. Данная система охлаждения не предусматривает принудительной циркуляции воздуха.

Для более эффективного охлаждения на баке трансформатора устанавливаются радиаторы, состоящие из ребер или труб, по которым осуществляется циркуляция масла.

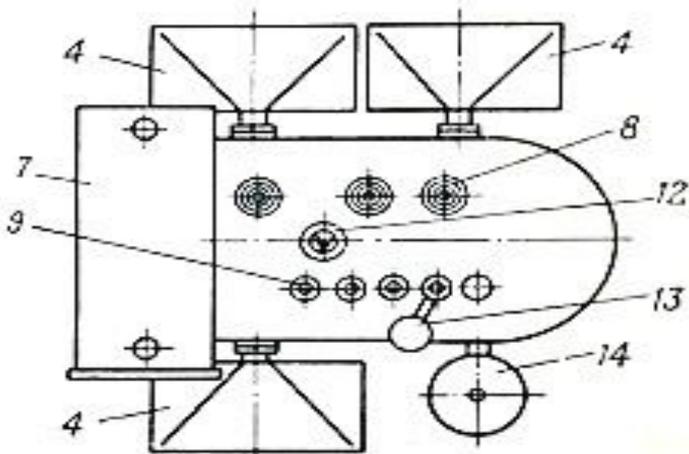
Система охлаждения М используется на силовых трансформаторах номинальной мощностью до 16 МВ*А. Отсутствие дополнительных устройств в конструкции трансформаторов данной системы охлаждения упрощает их эксплуатацию.

Обслуживающему персоналу необходимо лишь проверять уровень масла и температуру его верхних слоев. Уровень масла должен примерно соответствовать среднесуточной температуре окружающей среды с учетом нагрузки трансформатора (это актуально для всех типов охлаждения). Температура верхних слоев масла трансформаторов с охлаждением М и Д не должна превышать 95 град.

На рисунке ниже показан трехфазный двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением (с естественной циркуляцией масла) серии ТМ-250/6-10-66 мощностью 250 кВа, предназначенный для преобразования переменного трехфазного тока напряжением 6 — 10 кВ на стороне ВН, на стороне НН 0,23; 0,40; 0,69 кВ как для внутренней, так и для наружной установки.



Силовой серии ТМ-250/6-10 с термосифонным фильтром для непрерывной очистки масла: 1 — катки; 2 — болт заземления; 3 — бак; 4 — съемные радиаторные охладители; 5 — крышка; 6 — силикогелевый воздухоосушитель; 7 — расширитель с маслоуказателем; 8 — выходы ВН; 9 — выходы НН; 10 — ртутный термометр; 11 — пробка для заливки и взятия проб масла; 12 — переключатель; 13 — пробивной предохранитель; 14 — термосифонный фильтр очистки для непрерывной масла.



Естественное масляное охлаждение с дутьевым принципом работы (Д).

Аналогично системе охлаждения типа «М», но радиаторы дополнительно укомплектованы вентиляторами принудительного обдува, которые эффективно увеличивают теплообмен с окружающей средой.

Система охлаждения трансформатора Д – с дутьем и естественной циркуляцией масла. Трансформаторы данной системы охлаждения конструктивно имеют вентиляторы обдува, устанавливаемые в навесные радиаторы, по которым циркулирует трансформаторное масло.

Обдув трансформатора данной системы охлаждения включается при достижении температуры верхнего слоя трансформаторного масла 55 и более град., либо при достижении номинальной нагрузки трансформатора, не зависимо от температуры масла. Система охлаждения Д является более эффективной и используется для трансформаторов номинальной мощностью 16-80 МВ*А.



Принудительная циркуляция масла и дутье (ДЦ).

Этот вариант используют для трансформаторов с установленной мощностью от 63000 кВА. Масло внутри трансформатора циркулирует под давлением, создаваемым специальными маслонасосами. Интенсивный обдув радиаторов еще больше интенсифицирует теплообмен.

Система охлаждения ДЦ отличается от системы Д наличием принудительной циркуляции масла. Вентиляторы обдува, как и в системе Д охлаждают радиаторные трубы. По радиаторным трубам непрерывно циркулирует трансформаторное масло, которое перекачивается электрическими насосами, встроенными в маслопроводы бака трансформатора.

Быстрая циркуляция масла по радиаторам и их обдув обеспечивают высокую теплоотдачу. Благодаря данной системе охлаждения значительно снижены габариты силового трансформатора (автотрансформатора) и увеличена их номинальная мощность до пределов 63-160 МВ*А.

Принудительная циркуляция масла позволяет отойти от традиционной конструкции трансформаторов - бак трансформатора и охладитель могут стоять отдельно, соединенные между собой маслопроводами.

В отличие от охлаждения типа Д, вентиляторы обдува охлаждения ДЦ должны быть всегда включены в работу вместе с насосами принудительной циркуляции масла. В случае отключения одной из систем охлаждения трансформатор не может находиться в работе.

НДЦ отличается от охлаждения ДЦ наличием направленного потока масла, что позволяет повысить эффективность охлаждения и соответственно увеличить мощность трансформатора, не изменяя его размер.



Масляно-водяное охлаждение (Ц).

Представляет собой систему охлаждения, где для съема тепла с радиаторов используют воду, которая регулярно циркулирует по трубкам теплообменника. Этот вариант наиболее сложный в реализации и обслуживании, поэтому его используют только для трансформаторов с мощностью от 160 МВА.

Трансформаторы и автотрансформаторы мощностью от 160 МВ*А оборудуются системами охлаждения типа Ц. Это охлаждение масляно-водяное, по радиаторам трансформатора осуществлена циркуляция не только масла, но и воды.

Вода принудительно циркулирует по трубкам охлаждающего устройства, между которыми, в свою очередь, циркулирует трансформаторное масло. Перед входом в охладитель монтируются специальные датчики температуры для контроля температуры циркулируемого масла, которая не должна превышать 70 град.

Устройства принудительной циркуляции масла и воды должны быть всегда в работе, не зависимо от температуры и нагрузки, они должны включаться в работу автоматически одновременно с подачей напряжения на трансформатор (автотрансформатор).

При наличии конструктивно нескольких охлаждающих устройств, количество их одновременного включения в работу определяется величиной нагрузки и температурой охлаждающей среды - трансформаторного масла.

Данная система охлаждения одна из наиболее эффективных систем, но ее основным недостатком является сложность конструктивного исполнения и эксплуатации.

Для трансформаторов (автотрансформаторов) мощностью от 630 МВ*А применяется более эффективная масляно-водяная система охлаждения с направленным потоком масла - НЦ.

Определение коэффициента трансформации силовых трансформаторов

Коэффициентом трансформации (K) называется отношение напряжения обмотки ВН к напряжению обмотки НН при холостом ходе трансформатора:

$$K = \left(\frac{W_{\text{ВН}}}{W_{\text{НН}}} \right) \approx \left(\frac{E_{\text{ВН}}}{E_{\text{НН}}} \right) = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}$$

Если трансформатор монтируется без вскрытия и при этом ряд ответвлений, недоступен для измерений, определение коэффициента трансформации производится только для доступных ответвлений.

При испытании трехобмоточных трансформаторов коэффициент трансформации достаточно проверить для двух пар обмоток, причем измерения рекомендуется проводить на тех обмотках, для которых напряжение короткого замыкания наименьшее.

В паспорте каждого трансформатора даются номинальные напряжения обеих обмоток, относящиеся к режиму холостого хода. Поэтому номинальный коэффициент трансформации можно легко определить по их отношению.

Для трехобмоточных трансформаторов коэффициентом трансформации является отношение напряжений обмоток ВН/СН, ВН/НН и СН/НН.

Определение коэффициента трансформации силовых трансформаторов. Значение коэффициента трансформации позволяет проверить правильное число витков обмоток трансформатора, поэтому его определяют на всех ответвлениях обмоток и для всех фаз. Эти измерения, кроме проверки самого коэффициента трансформации, дают возможность проверить правильность установки переключателя напряжения на соответствующих ступенях, а также целостность обмоток.

Измеренный коэффициент трансформации на всех ступенях переключателя ответвлений не должен отличаться более чем на 2 % от коэффициента трансформации на том же ответвлении на других фазах или от паспортных данных, или от данных предыдущих измерений. В случае более значительного отклонения должна быть выяснена его причина. При отсутствии виткового замыкания трансформатор может быть введен в работу.

Коэффициент трансформации определяют следующими методами:

- а) двух вольтметров;
- б) моста переменного тока;
- в) постоянного тока;
- г) образцового (стандартного) трансформатора и др.

Коэффициент трансформации рекомендуется определять методом двух вольтметров (рис. 1).

Принципиальная схема для определения коэффициента трансформации методом двух вольтметров для однофазных трансформаторов дана на рис. 1,а. Напряжение, подводимое к двум обмоткам трансформатора, одновременно измеряют двумя разными вольтметрами.

При испытании трехфазных трансформаторов одновременно измеряют линейные напряжения, соответствующие одноименным зажимам обеих проверяемых обмоток. Подводимое напряжение не должно превышать номинального напряжения трансформатора и быть чрезмерно малым, чтобы на результаты измерений не могли повлиять ошибки вследствие потери напряжения в обмотках от тока холостого хода и тока, обусловленного присоединением измерительного прибора к зажимам вторичной обмотки.

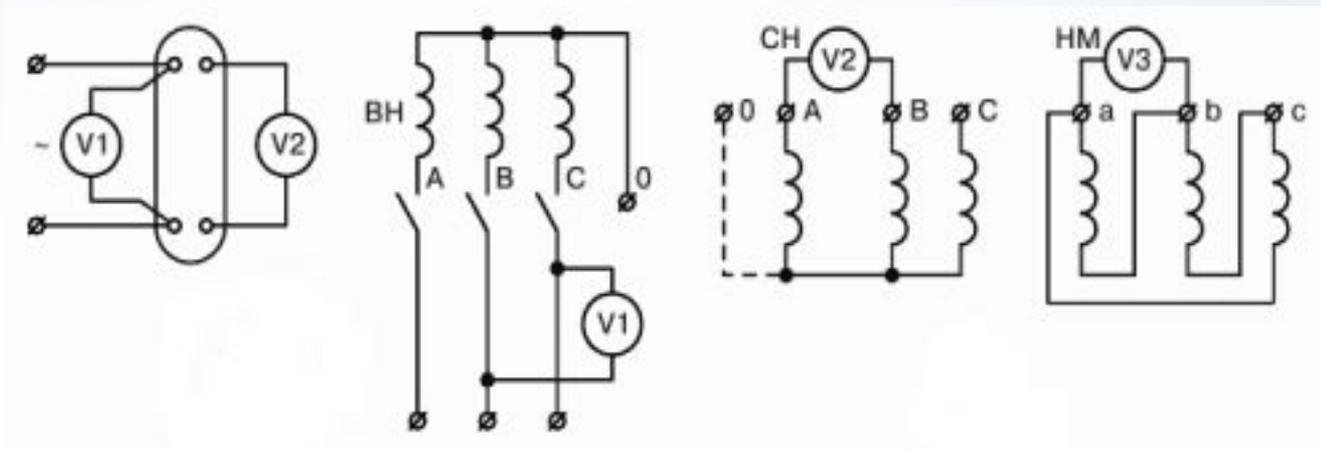


Рис. 1. Метод двух вольтметров для определения коэффициентов трансформации: а – для двухобмоточных и б – трехобмоточных трансформаторов

Подводимое напряжение должно быть от одного (для трансформаторов большой мощности) до нескольких десятков процентов номинального напряжения (для трансформаторов небольшой мощности), если испытания проводятся с целью проверки паспортных данных трансформаторов.

В большинстве случаев к трансформатору подводят напряжение от сети 380 В. В случае необходимости вольтметр присоединяется через трансформатор напряжения или включается с добавочным сопротивлением. Классы точности измерительных приборов – 0,2–0,5. Допускается присоединять вольтметр V_1 к питающим проводам, а не к вводам трансформатора, если это не отразится на точности измерений из-за падения напряжения в питающих проводах.

При испытании трехфазных трансформаторов симметричное трехфазное напряжение подводят к одной обмотке и одновременно измеряют линейные напряжения на линейных зажимах первичной и вторичной обмоток.

При измерении фазных напряжений допускается определение коэффициента трансформации по фазным напряжениям соответствующих фаз. При этом проверку коэффициента трансформации производят при однофазном или трехфазном возбуждении трансформатора.

Если коэффициент трансформации был определен на заводе-изготовителе, то при монтаже целесообразно измерять те же напряжения. При отсутствии симметричного трехфазного напряжения коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов, имеющих схему соединения обмоток Д/У или У/Д, можно определить при помощи фазных напряжений с поочередным закорачиванием фаз.

Для этого одну фазу обмотки (например, фазу А), соединенную в треугольник, закорачивают соединением двух соответствующих линейных зажимов данной обмотки. Затем при однофазном возбуждении определяют коэффициент трансформации оставшейся свободной пары фаз, который при данном методе должен быть равным $2 K_{\phi}$ для системы Д/У при питании со стороны звезды (рис. 2) или $K_{\phi}/2$ для схемы У/Д при питании со стороны треугольника, где K_{ϕ} – фазный коэффициент трансформации (рис. 3).

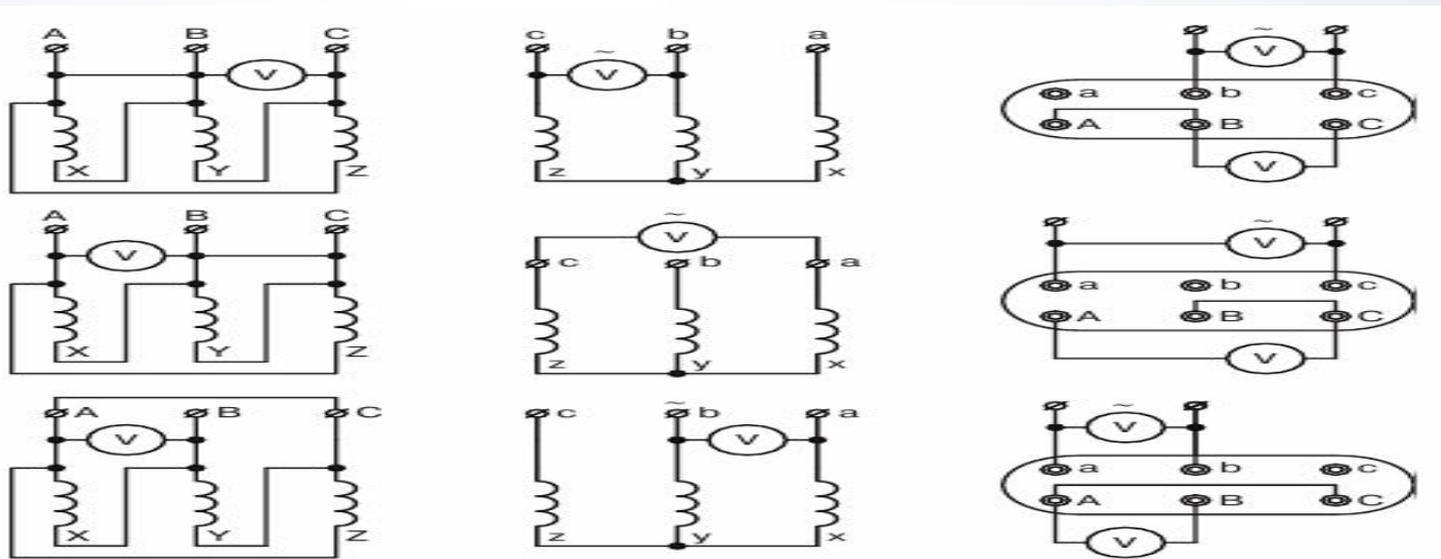


Рис. 2. Определение коэффициентов трансформации трансформатора, соединенного по схеме Д/У, при несимметричном трехфазном напряжении: а – первое; б – второе и в – третье измерения

Аналогичным образом производят измерения при накоротко замкнутых фазах В и С. При испытании трехобмоточных трансформаторов коэффициент трансформации достаточно проверить для двух пар обмоток (см. рис. 1,б).

Если у трансформатора выведена нейтраль и доступны все начала и концы обмоток, то определение коэффициента трансформации можно производить для фазных напряжений. Проверку коэффициента трансформации по фазным напряжениям производят при однофазном или трехфазном возбуждении трансформатора.

Для трансформаторов с РПН разница коэффициента трансформации не должна превышать значения ступени регулирования. Коэффициент трансформации при приемосдаточных испытаниях определяется дважды – первый раз до монтажа, если паспортные данные отсутствуют или вызывают сомнения, и второй раз непосредственно перед вводом в эксплуатацию при снятии характеристики холостого хода.

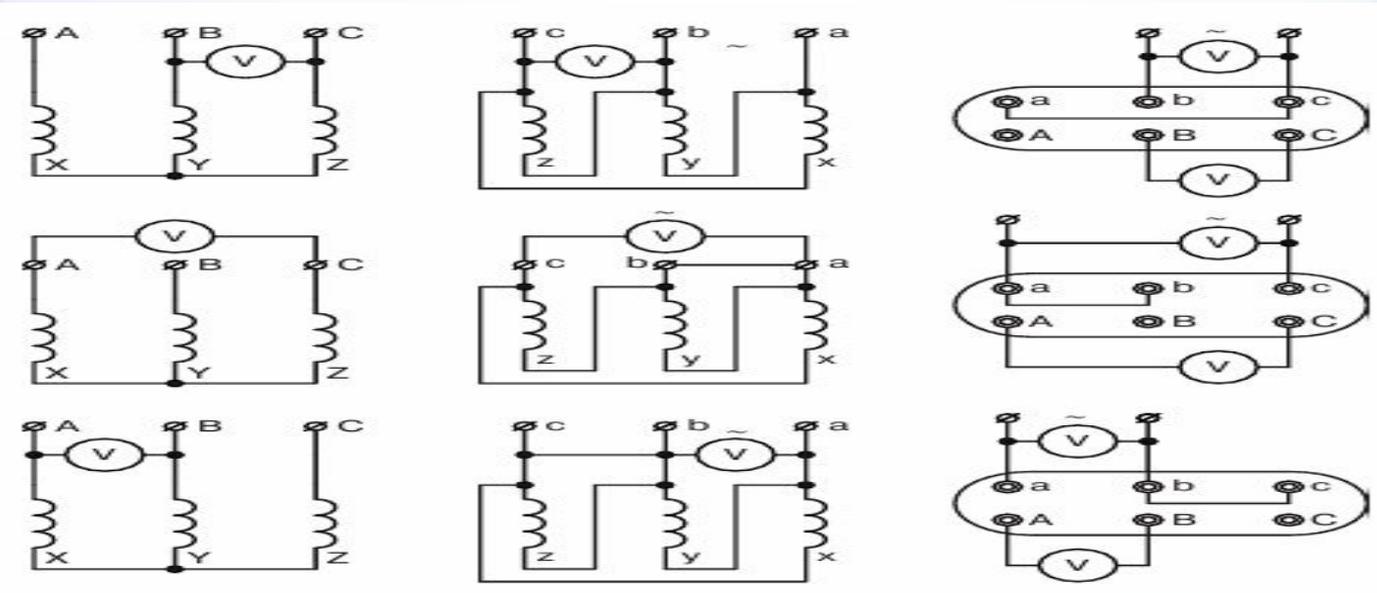


Рис. 3. Определение коэффициентов трансформации трансформатора, соединенного по схеме У/Д, при несимметричном трехфазном напряжении: а – первое; б – второе и в – третье измерения

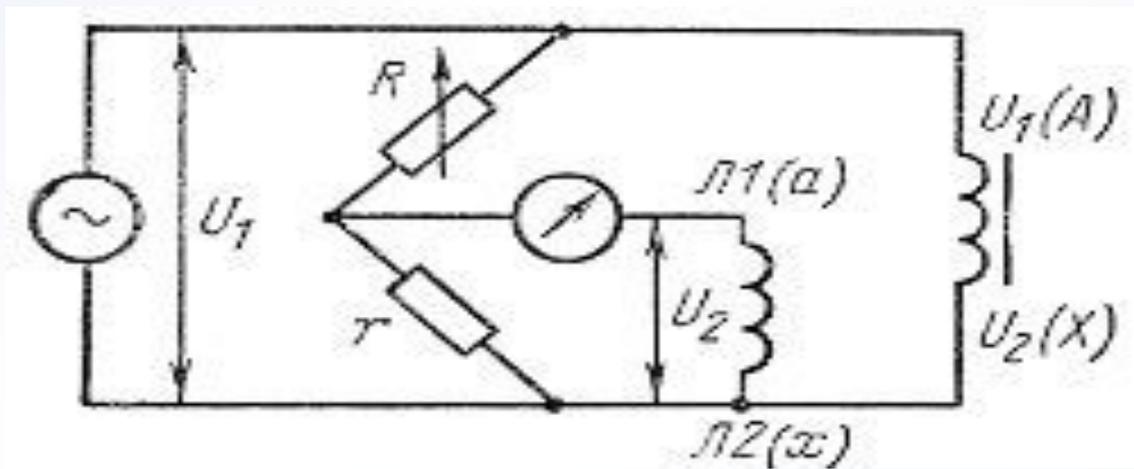


Рис. 4. Принципиальная схема универсального прибора типа УИКТ-3

Для ускорения измерения коэффициента трансформации применяется универсальный прибор типа УИКТ-3, которым можно измерить коэффициенты трансформации силовых и измерительных трансформаторов тока и напряжения без применения постороннего источника переменного тока. Одновременно с измерением коэффициента трансформации определяется полярность первичной и вторичной обмоток. Погрешность в измерении не должна превышать 0,5 % измеряемой величины.

Принцип работы прибора основан на сравнении напряжений, индуцируемых во вторичной и первичной обмотках трансформатора, с падением напряжения на известных сопротивлениях (рис. 4). Сравнение производится по мостовой схеме.

Режимы работы нейтралей трансформаторов

Трансформаторы имеют нейтралю, режим работы или способ рабочего заземления которых обусловлен:

1. требованиями техники безопасности и охраны труда персонала,
2. допустимыми токами замыкания на землю,
3. перенапряжениями, возникающими при замыканиях на землю, а также рабочим напряжением
4. неповрежденных фаз электроустановки по отношению к земле, определяющих уровень изоляции электротехнических устройств,
5. необходимостью обеспечения надежной работы релейной защиты от замыкания на землю,
6. возможностью применения простейших схем электрических сетей.

При однофазном замыкании на землю нарушается симметрия электрической системы: изменяются напряжения фаз относительно земли, появляются токи замыкания на землю, возникают перенапряжения в сетях. Степень изменения симметрии зависит от режима нейтрали.

Режим нейтрали оказывает существенное влияние на режимы работы электроприемников, схемные решения системы электроснабжения, параметры выбираемого оборудования.

Нейтраль сети — это совокупность соединенных между собой нейтральных точек и проводников, которая может быть изолирована от сети либо соединена с землей через малые или большие сопротивления.

Используются следующие режимы нейтрали:

1. глухозаземленная нейтраль,
2. изолированная нейтраль,
3. эффективно заземленная нейтраль

Выбор режима нейтрали в электрических сетях определяется бесперебойностью электроснабжения потребителей, надёжностью работы, безопасностью обслуживающего персонала и экономичностью электроустановок.

Нейтрали трансформаторов трёхфазных электрических установок, к обмоткам которых подключены электрические сети, могут быть заземлены непосредственно, либо через индуктивные или активные сопротивления, либо изолированы от земли.

Если нейтраль обмотки трансформатора присоединена к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление, то такая нейтраль называется **глухозаземлённой**, а сети, подсоединённые к ней, соответственно, - сетями с **глухозаземлённой нейтралью**.

Нейтраль, не соединённая с заземляющим устройством называется **изолированной нейтралью**.

Сети, нейтраль которых соединена с заземляющим устройством через реактор (индуктивное сопротивление), компенсирующий ёмкостной ток сети, называются сетями с резонанснозаземлённой либо компенсированной нейтралью.

Сети, нейтраль которых заземлена через резистор (активное сопротивление) называется сеть с резистивнозаземлённой нейтралью.

Электрическая сеть, напряжением выше 1 кВ, в которой коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4 (коэффициент замыкания на землю – отношение разности потенциалов между неповреждённой фазой и землёй в точке замыкания на землю другой или двух других фаз к разности потенциалов между фазой и землёй в этой точке до замыкания) называется сеть с эффективнозаземлённой нейтралью.

Электроустановки в зависимости от мер электробезопасности разделяются на 4 группы:

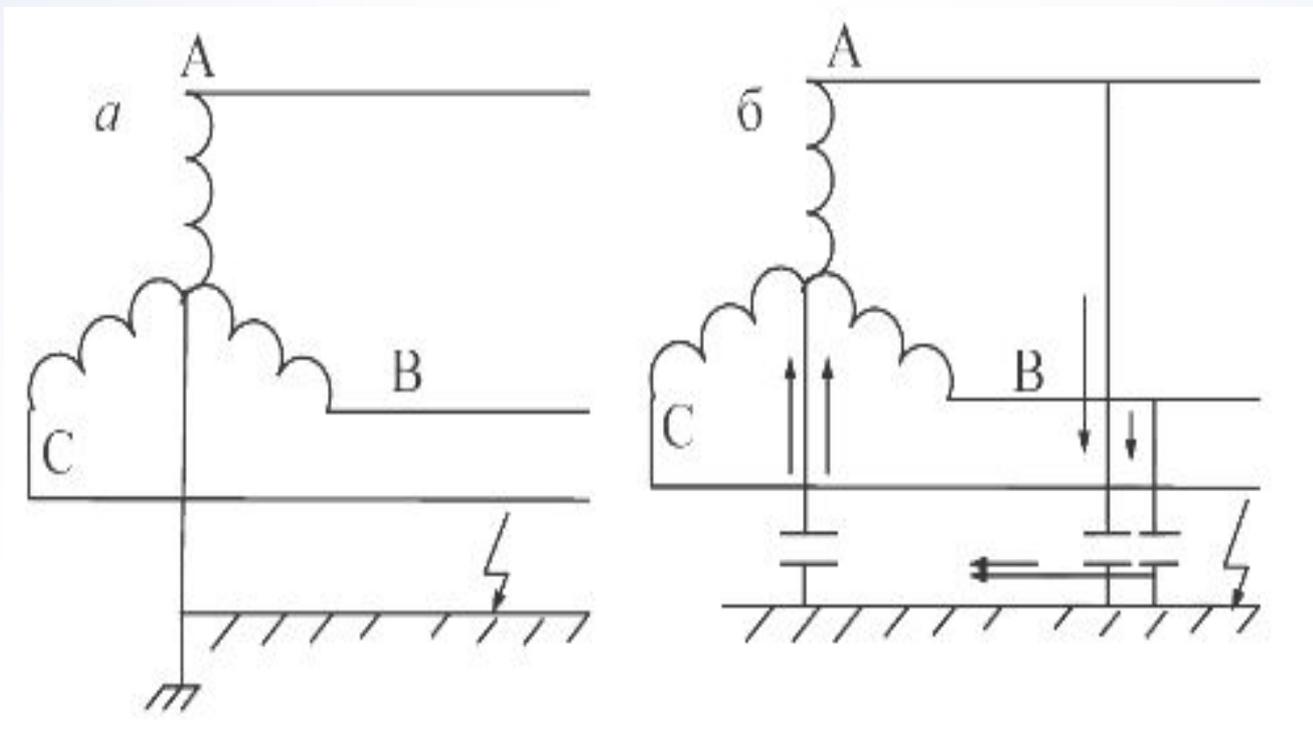
1. электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с эффективнозаземленной нейтралью (с большими токами замыкания на землю),
2. электроустановки напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью (с малыми токами замыкания на землю),
3. электроустановки напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью,
4. электроустановки напряжением до 1 кВ с изолированной нейтралью.

Режимы нейтрали трехфазных систем

Напряжение, кВ	Режим нейтрали	Примечание
0,23	Глухозаземленная нейтраль	Требования техники безопасности. Заземляются все корпуса электрооборудования
0,4		
0,69	Изолированная нейтраль	Для повышения надежности электроснабжения
3,3		
6		
10		
20		
35		
110	Эффективно заземленная нейтраль	Для снижения напряжения незамкнутых фаз относительно земли при замыкании одной фазы на землю и снижения расчетного напряжения изоляции
220		
330		
500		
750		
1150		

Системы с **глухозаземленной нейтралью** - это системы с большим током короткого замыкания на землю. При коротком замыкании место замыкания отключается автоматически. В системах 0,23 кВ и 0,4 кВ это отключение диктуется требованиями техники безопасности. Одновременно заземляются все корпуса оборудования.

Системы 110 и 220 кВ и выше выполняются с **эффективно заземленной нейтралью**. При коротком замыкании место замыкания также отключается автоматически. Здесь заземление нейтрали приводит к снижению расчетного напряжения изоляции. Оно равно фазному напряжению неповрежденных фаз относительно земли. Для ограничения величины токов короткого замыкания на землю заземляются не все нейтрали трансформаторов (эффективное заземление).



Режимы нейтрали трехфазных систем: а - заземленная нейтраль, б - изолированная нейтраль

Изолированной нейтралью называется нейтраль, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная через аппараты, компенсирующие емкостный ток в сети, трансформаторы напряжения и другие аппараты, имеющие большое сопротивление.

Система с изолированной нейтралью применяется для повышения надежности электроснабжения. Характеризуется тем, что при замыкании одной фазы на землю возрастает напряжение фазных проводов относительно земли до линейного напряжения, и симметрия напряжений нарушается. Между линией и нейтралью протекает емкостной ток. Если он меньше 5А, то допускается продолжение работы до 2 ч для турбогенераторов мощностью до 150 МВт и для гидрогенераторов - до 50 МВт. Если установлено, что замыкание произошло не в обмотке генератора, а в сети, то допускается работа в течение 6 ч.

Сети от 1 до 10 кВ — это сети генераторного напряжения электрических станций и местные распределительные сети. При замыкании на землю одной фазы в такой системе напряжение неповрежденных фаз относительно земли возрастает до величины линейного напряжения. Поэтому изоляция должна быть рассчитана на это напряжение.

Основное преимущество режима изолированной нейтрали — способность подавать энергию электроприемникам и потребителям при однофазном замыкании на землю.

Недостатком этого режима являются трудности с обнаружением места замыкания на землю.

Повышенная надежность режима (т.е. возможность нормальной работы при однофазных замыканиях на землю, которые составляют значительную часть повреждений электрооборудования) изолированной нейтрали обуславливает обязательное его применение при напряжении выше 1 кВ до 35 кВ включительно, поскольку эти сети питают большие группы электроприемников и потребителей.

С напряжения 110 кВ и выше применение режима изолированной нейтрали становится экономически невыгодным, так как повышение напряжения относительно земли с фазного до линейного требует существенного усиления фазной изоляции. Применение режима изолированной нейтрали до 1 кВ допускается и оправданно при повышенных требованиях к электробезопасности.

Регулирование напряжения трансформатора

Проблема состоит в том, что напряжение в электрической сети меняется в зависимости от ее нагруженности, в то время как для адекватной работы большинства потребителей электроэнергии необходимым условием является нахождение питающего напряжения в определенном диапазоне, чтобы оно не было бы выше или ниже определенных приемлемых границ.



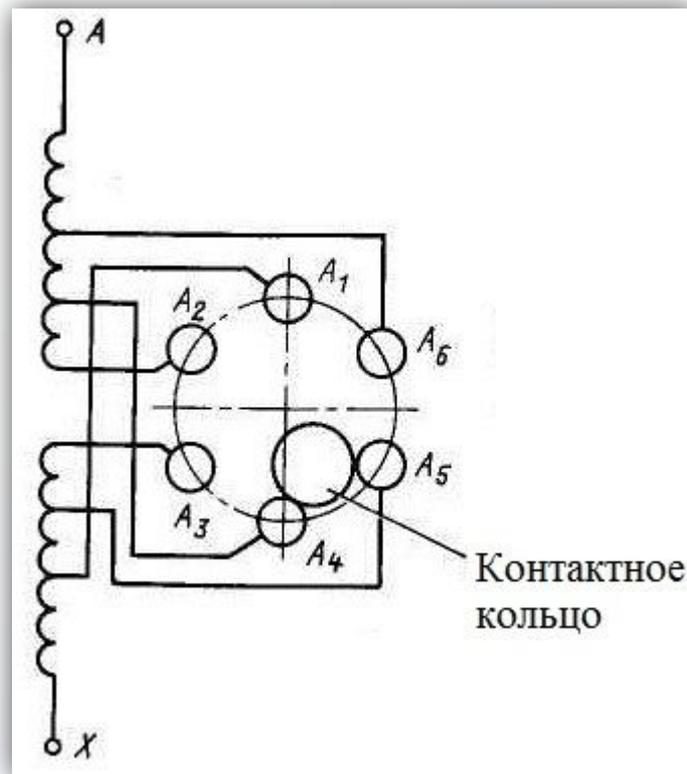
Поэтому и нужны какие-то способы подстройки, регулирования, корректировки сетевого напряжения. Один из лучших способов — это изменение по мере надобности коэффициента трансформации путем уменьшения или увеличения числа витков в первичной или во вторичной обмотке трансформатора, в соответствии с известной формулой: $U_1/U_2 = N_1/N_2$.

Для регулировки напряжения на вторичных обмотках трансформаторов, с целью поддержания у потребителей правильной величины напряжения, - у некоторых трансформаторов предусмотрена возможность изменять соотношение витков, то есть корректировать таким образом в ту или иную сторону коэффициент трансформации.

подавляющее большинство современных силовых трансформаторов оснащено специальными устройствами, позволяющими выполнять регулировку коэффициента трансформации, то есть добавлять или убавлять витки в обмотках.

Такая регулировка может выполняться либо прямо под нагрузкой, либо только тогда, когда трансформатор заземлен и полностью обесточен. В зависимости от значимости объекта, и от того, насколько часто необходимы данные регулировки, - встречаются более или менее сложные системы переключения витков в обмотках: *осуществляющие ПБВ - «переключение без возбуждения» или РПН - «регулирование под нагрузкой»*. В обоих случаях обмотки трансформатора имеют ответвления, между которыми и происходит переключение.

Переключение без возбуждения



Переключение без возбуждения выполняют от сезона — к сезону, это плановые сезонные переключения витков, когда трансформатор выводится из эксплуатации, что конечно не получилось бы делать часто. Коэффициент трансформации изменяют, делают больше или меньше в пределах 5%.

На мощных трансформаторах переключение выполняется с помощью четырех ответвлений, на маломощных — при помощи всего двух. Данный тип переключения сопряжен с прерыванием электроснабжения потребителей, поэтому и выполняется он достаточно редко.

Зачастую ответвления сделаны на стороне высшего напряжения, где витков больше и корректировка получается более точной, к тому же ток там меньше, переключатель выходит компактнее. Изменение магнитного потока в момент такого переключения витков на понижающем трансформаторе очень незначительно.

Если требуется повысить напряжение на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора, то витков на первичной обмотке убавляют, если требуется понизить — прибавляют. Если же регулировка происходит на стороне нагрузки, то для повышения напряжения витков на вторичной обмотке прибавляют, а для понижения — убавляют. Переключатель, применяемый на обесточенном трансформаторе, называют в просторечии анцапфой.

Место контакта, хотя и выполнено подпружиненным, со временем оно подвергается медленному окислению, что приводит к росту сопротивления и к перегреву. Чтобы этого вредного накопительного эффекта не происходило, чтобы газовая защита не срабатывала из-за разложения масла под действием излишнего нагрева, переключатель регулярно обслуживают: дважды в год проверяют правильность установки коэффициента трансформации, переключая при этом анцапфу во все положения, дабы убрать с мест контактов оксидную пленку, прежде чем окончательно установить требуемый коэффициент трансформации.

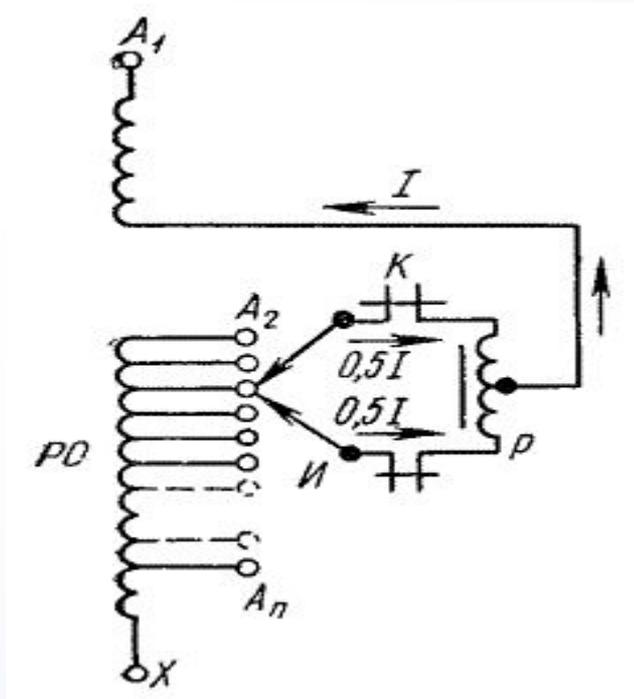
Также измеряют сопротивление обмоток постоянному току, чтобы убедиться в качестве контакта. Эту процедуру выполняют и для трансформаторов, которые долго не эксплуатировались, прежде чем начинать их использовать.

Регулирование под нагрузкой

Оперативные переключения осуществляются автоматически либо в ручную, прямо под нагрузкой, там где в разное время суток напряжение сильно изменяется. Мощные и маломощные трансформаторы, в зависимости от напряжения, имеют РПН разных диапазонов — от 10 до 16% с шагом в 1,5% на стороне высшего напряжения, - там, где ток меньше.

Здесь, конечно, есть некоторые сложности: просто рвать цепь на мощном трансформаторе нельзя, т. к. в этом случае возникнет дуга и трансформатор просто выйдет из строя; кратковременно витки замыкаются между собой накоротко; необходимы устройства ограничения тока.

Токоограничительные реакторы в системах РПН



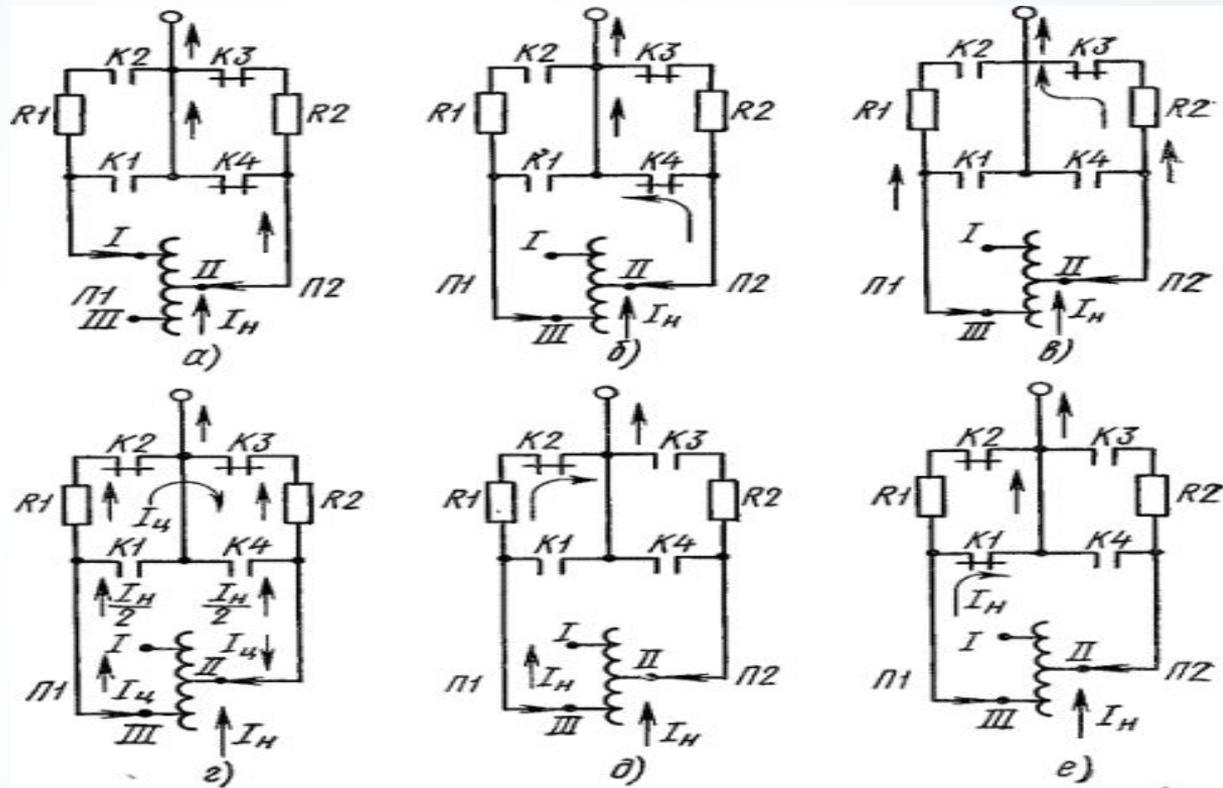
Регулирование под нагрузкой с ограничением тока позволяет осуществить система с двумя контакторами и двухобмоточным реактором.

К двум обмоткам реактора подключено по контактору, которые в обычном рабочем режиме трансформатора сомкнуты, примыкая к одному и тому же контакту на выводе обмотки. Рабочий ток проходит через обмотку трансформатора, затем параллельно через два контактора и через две части реактора.

В процессе переключения один из контакторов переводится на другой вывод обмотки трансформатора (назовем его «вывод 2»), при этом часть обмотки трансформатора оказывается накоротко шунтирована, а рабочий ток ограничивается реактором. Затем второй контакт реактора переводится на «вывод 2».

Процесс регулирования завершен. Переключатель с реактором имеет небольшие потери в средней точке, так как ток нагрузки наложен на конвекционный ток двух переключателей, и реактор может все время находится в цепи.

Токоограничительные резисторы в системах РПН



Альтернатива реактору — триггерный пружинный контактор, в котором происходит последовательно 4 быстрых переключения с использованием промежуточных положений, когда ток ограничивается резисторами. В рабочем положении ток идет через шунтирующий контакт К4.

Когда требуется произвести переключение цепи из положения II в положение III (в данном случае - с меньшим количеством витков), - избиратель переводится с контакта I на контакт III, затем параллельно замкнутому контактору К4 подключается резистор R2 через контактор К3, затем контактор К4 размыкается, и теперь ток в цепи ограничен только резистором R2.

Следующим шагом замыкается контактор К2, и часть тока устремляется также через резистор R1. Контактор К3 размыкается, отсоединяя резистор R2, замыкается шунтирующий контакт К1. Переключение завершено.

Если у переключателя с реактором реактивный ток прервать трудно, и поэтому он используется чаще на стороне низкого напряжения с большими токами, то быстродействующий переключатель с резисторами успешно используется на стороне высокого напряжения с относительно малыми токами.

Переходные процессы при включении и при внезапном коротком замыкании трансформаторов

При переходе трансформатора из одного установившегося режима в другой возникают переходные процессы. Так как каждый установившийся режим характеризуется определенным значением энергии электромагнитных полей, то в течение переходного процесса происходит изменение энергии этих полей. Наибольший практический интерес представляют переходные процессы при включении трансформатора и коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки.

Включение трансформатора в сеть.

В этом случае результирующий магнитный поток можно рассматривать как сумму трех составляющих:

$$\Phi = \Phi_{\text{уст}} + \Phi_{\text{пер}} \pm \Phi_{\text{ост}} \quad (4.1)$$

где $\Phi_{\text{уст}}$ — магнитный поток установившийся; $\Phi_{\text{пер}}$ — магнитный поток переходного процесса; $\Phi_{\text{ост}}$ — магнитный поток остаточного магнетизма, направленный либо согласно с установившимся потоком (знак «+»), либо встречно ему (знак «-»).

Магнитный поток переходного процесса затухающий и постоянен по направлению

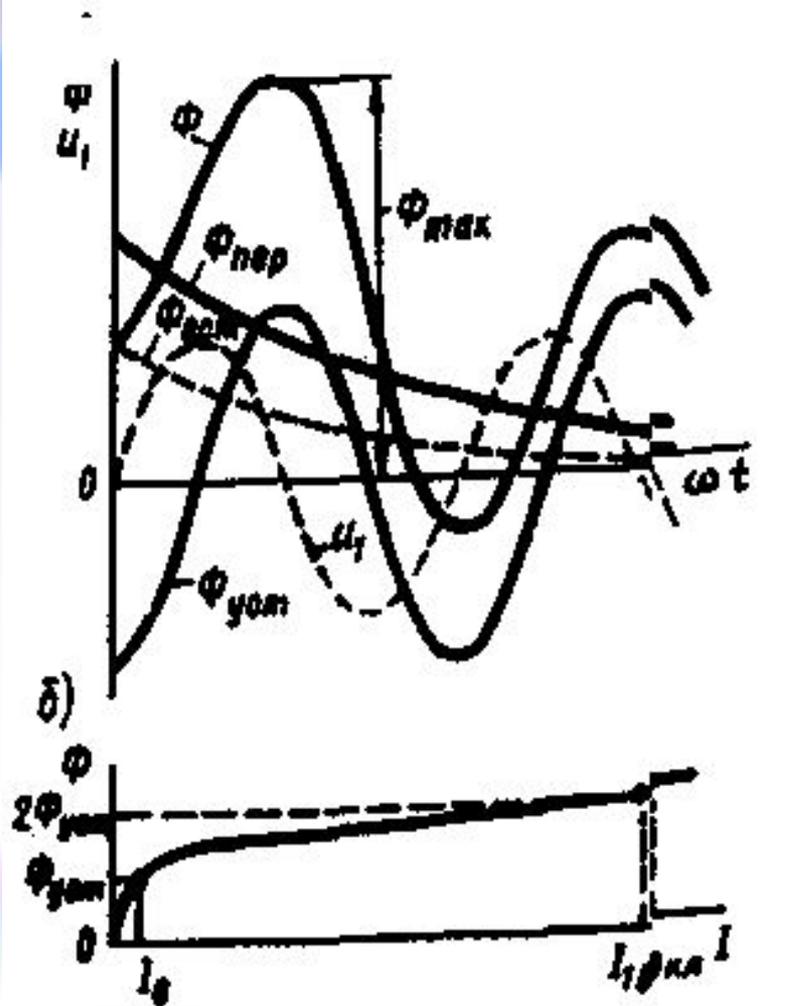


Рис. 4.1. Графики перехода процессов при включении трансформатора (а) и определение тока включения трансформатора по кривой намагничивания (б)

Наиболее благоприятный случай включения трансформатора в сеть будет при потоке остаточного магнетизма, направленном встречно установившемуся потоку, и мгновенном значении первичного напряжения $u_1 = 0$. При этом магнитный поток установившийся $\Phi_{уст}$ будет максимальным, так как он отстает по фазе от напряжения на угол приблизительно 90° (рис. 4.1,а).

Магнитный поток Φ становится наибольшим приблизительно через половину периода после включения трансформатора. Если магнитопровод трансформатора не насыщен, то в момент включения трансформатора в первичной обмотке появится намагничивающий ток, пропорциональный магнитному потоку. Если же магнитопровод трансформатора насыщен, то при включении трансформатора намагничивающий ток включения достигает значительной силы, называемой *сверхтоком холостого хода*. Из построений, сделанных на кривой намагничивания (рис. 4.1, б), видно, что при магнитном потоке, превышающем в два раза установившееся значение $\Phi = 2\Phi_{уст}$, сверхток холостого хода достигает силы, во много раз превышающей установившееся значение тока х.х. ($I_{1вкл} \gg I_0$). При наиболее неблагоприятных условиях сверхток х.х. может в 6—8 раз превысить номинальное значение первичного тока.

Так как длительность переходного процесса невелика и не превышает нескольких периодов переменного тока, то ток включения для трансформатора не опасен. Однако его следует учитывать при регулировке аппаратуры защиты, чтобы в момент включения трансформатора не произошло его неправильного отключения от сети. Бросок тока включения следует также учитывать при наличии в цепи первичной обмотки трансформатора чувствительных измерительных приборов. Во избежание поломки этих приборов нужно до включения трансформатора в сеть шунтировать их токовые обмотки.

Thanks!

CREDITS: This presentation template was created by **Slidesgo**, including icons by **Flaticon** and infographics & images by **Freepik**

