

Трансформаторы

Из истории.

В **1831** году английским физиком Майклом Фарадеем было открыто явление электромагнитной индукции, лежащее в основе действия электрического трансформатора, при проведении им основополагающих исследований в области электричества.

Схематичное изображение будущего трансформатора впервые появилось в **1831** году в работах Фарадея и Генри. Однако ни тот, ни другой не отмечали в своём приборе такого свойства трансформатора, как изменение напряжений и токов, то есть трансформирование переменного тока.

В **1848** году французский механик Г. Румкорф изобрёл индукционную катушку особой конструкции. Она явилась прообразом трансформатора.

30 ноября 1876 года, дата получения патента Яблочковым Павлом Николаевичем, считается датой рождения первого трансформатора. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки.

Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в **1884** году братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон.

В **1885** г. венгерские инженеры фирмы «Ганц и К°» Отто Блати, Карой Циперновский и Микша Дери изобрели трансформатор с замкнутым магнитопроводом, который сыграл важную роль в дальнейшем развитии конструкций трансформаторов.

Большую роль для повышения надежности трансформаторов сыграло введение масляного охлаждения (конец **1880**-х годов, Д.Свинберн). Свинберн помещал трансформаторы в керамические сосуды, наполненные маслом, что значительно повышало надежность изоляции обмоток.

С изобретением трансформатора возник технический интерес к переменному току. Русский электротехник Михаил Осипович Доливо-Добровольский в **1889** г. предложил **трёхфазную систему переменного тока** с тремя проводами (трехфазная система переменного тока с шестью проводами изобретена Николой Тесла).

На электротехнической выставке во Франкфурте-на-Майне в **1891** г. Доливо-Добровольский демонстрировал опытную высоковольтную электропередачу трёхфазного тока протяжённостью 175 км. Трёхфазный генератор имел мощность 230 кВт при напряжении 95 В.

1928 год можно считать началом производства силовых трансформаторов в СССР, когда начал работать Московский трансформаторный завод (впоследствии — Московский электрозавод).

Основные понятия и принцип действия

Трансформатор представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

На рис.1 представлено графическое изображение трансформатора в упрощенном виде.

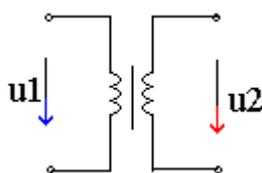


Рис.1

В системах энергоснабжения трансформатор обозначается в виде двух сцепленных между собой колец. На рис.2 представлен пример электрической системы энергоснабжения района.

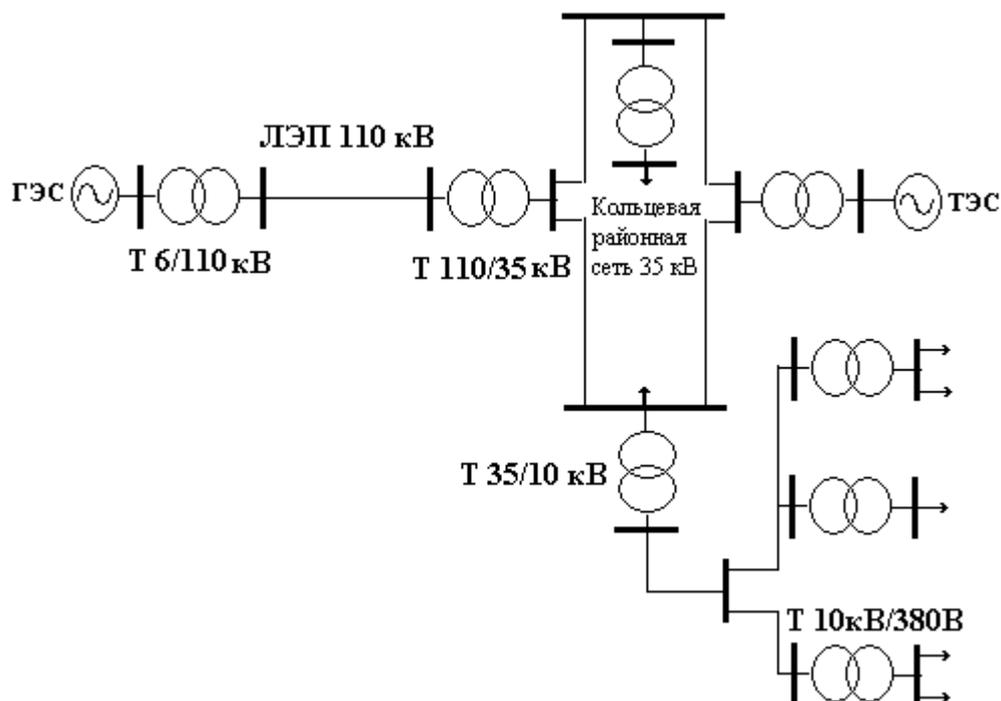


Рис.2

На рис.3 представлена активная часть однофазного трансформатора (магнитопровод с двумя катушками), где: W_1 , W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток, соответственно; u_1 , i_1 – напряжение и ток входа; u_2 , i_2 – напряжение и ток выхода.

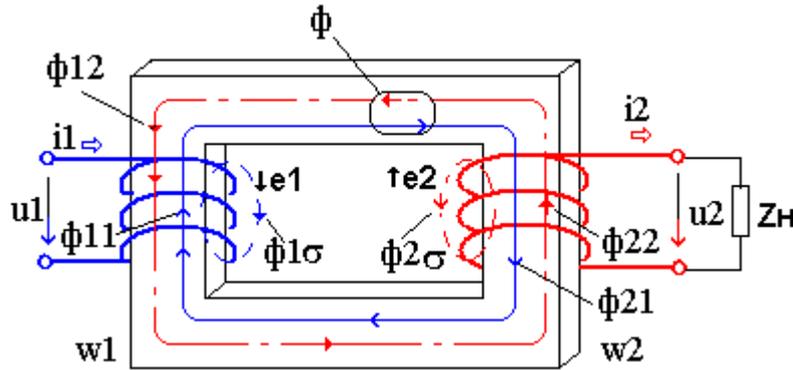


Рис.3

ϕ_{11} - поток первой обмотки;
 $\phi_{1\sigma}$ – поток рассеяния первой обмотки;
 ϕ_{12} - поток в области первой катушки от тока второй обмотки;
 ϕ_{22} - поток второй обмотки;
 $\phi_{2\sigma}$ – поток рассеяния второй обмотки;
 ϕ_{21} - поток в области второй обмотки от тока первой обмотки;
 ϕ – результирующий магнитный поток.

Если напряжение первичной обмотки выше напряжения вторичной обмотки, то такой трансформатор называется понижающим. Если ситуация обратная, трансформатор будет повышающим.

Принцип работы трансформатора основан на законе электромагнитной индукции Фарадея. *Электродвижущая сила, возникающая в проводящем контуре, определяется скоростью изменения магнитного потока, проходящего через площадь, ограниченную контуром.*

Если к одной из обмоток трансформатора, например к обмотке, w_1 подведено синусоидальное напряжение u_1 , то по этой обмотке будет протекать синусоидальный ток i_1 , который создает синусоидально изменяющийся магнитный поток ϕ_{11} , замыкающийся по сердечнику. Поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции e_1 , во вторичной обмотке w_2 ЭДС взаимной индукции e_2 . При подключении к вторичной обмотке нагрузки Z_H в этой обмотке возникает вторичный ток i_2 . На зажимах нагрузки появляется вторичное напряжение u_2 . Результирующий поток в сердечнике

трансформатора Φ создается токами обеих обмоток, при этом поток вторичной обмотки Φ_{22} направлен против потока первичной обмотки Φ_{11} .

В результате взаимодействия двух контуров (обмоток) с токами электрическая энергия будет передаваться (трансформироваться) из первичного контура во вторичный без электрической связи между ними.

Помимо основного (рабочего) потока Φ , токи обмоток создают потоки рассеяния $\Phi_{1\sigma}$ и $\Phi_{2\sigma}$, которые определены образом влияют на работу трансформатора.

Электромагнитные процессы в однофазных трансформаторах

Электрические соотношения в идеальном трансформаторе

Назовем идеальным такой трансформатор, в котором:

Отсутствуют потери энергии (потери в обмотках и потери в стальном сердечнике равны нулю);

Магнитная проницаемость стали сердечника равна бесконечности и в листах стали нет разъемов и стыков;

Магнитный поток замыкается только по сердечнику трансформатора (потоки рассеяния равны нулю).

ЭДС первичной и вторичной обмоток такого трансформатора при синусоидальных токах соответственно равны:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d\phi_m \sin(\omega t)}{dt} = -\omega w_1 \phi_m \cos(\omega t)$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d\phi_m \sin(\omega t)}{dt} = -\omega w_2 \phi_m \cos(\omega t)$$

Где: ϕ_m – амплитуда магнитного потока; ω – угловая частота тока в обмотках; Ψ_1, Ψ_2 – потокосцепления соответственно первичной и вторичной обмоток.

Действующие значения этих ЭДС

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f w_1 \phi_m = 4.44 f w_1 \phi_m$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_2 \phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f w_2 \phi_m = 4.44 f w_2 \phi_m$$

Где: f – частота тока ($f = \omega/2\pi$).

Коэффициент трансформации k можно определить из выражений:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Поскольку в идеальном трансформаторе потери активной и реактивной энергии отсутствуют, то справедливо соотношение мощностей:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \text{ откуда } k = U_1/U_2 = I_2/I_1$$

Где: U_1, I_1 и U_2, I_2 – действующие значения напряжений и токов соответственно в первичной и вторичной обмотках.

В реальных трансформаторах, при номинальных нагрузках, полученные соотношения имеют незначительную погрешность, приемлемую для инженерных расчетов.

Векторная диаграмма и схема замещения реального однофазного трансформатора.

Напряжение, приложенное к первичной обмотке реального трансформатора, уравновешивается ЭДС e_1 от рабочего потока, ЭДС $e_{1\sigma}$ от потоков рассеяния, а также падением напряжения на активном сопротивлении обмотки R_1 . Отмеченная ситуация справедлива и для вторичной цепи. На рис.1 представлена схема реального трансформатора.

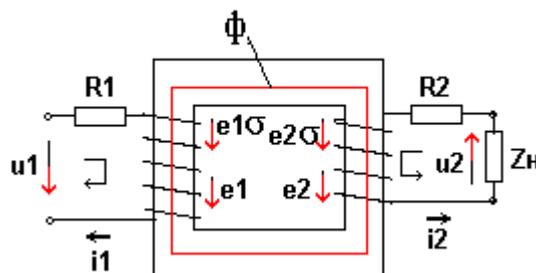


Рис.1

Для первичного и вторичного контуров запишем уравнения Кирхгофа.

$$\begin{aligned} e_1 + e_{1\sigma} &= -u_1 + R_1 \cdot i_1 \\ e_2 + e_{2\sigma} &= u_2 + R_2 \cdot i_2 \end{aligned}$$

С учетом того, что $e_{1\sigma} = -L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt}$ и $e_{2\sigma} = -L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt}$, получим:

$$u_1 = -e_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + R_1 \cdot i_1;$$

$$u_2 = e_2 - L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt} - R_2 \cdot i_2$$

Для синусоидальных величин представим полученные уравнения в комплексной форме записи:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + R_1 \cdot \underline{I}_1;$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - jX_{2\sigma} \cdot \underline{I}_2 - R_2 \cdot \underline{I}_2$$

Полученные уравнения характеризуют электрическое состояние первичной и вторичной цепей. Так как магнитный поток охватывает оба контура, то уравнение магнитной связи, выраженное через магнитодвижущие силы (МДС) имеет вид:

$$\underline{F1} = \underline{F1o} + (-\underline{F2}) \text{ или } \underline{I1} \cdot \underline{w1} = \underline{I1o} \cdot \underline{w1} + (-\underline{I2} \cdot \underline{w2})$$

Где: $F1; I1w1$ – результирующая МДС;

$F1o; I1o w1$ – МДС холостого хода (намагничивает сердечник трансформатора);

$F2; I2 w2$ – МДС вторичного контура (знак минус показывает, что магнитный поток вторичного контура направлен встречно потоку первичного контура).

Полученные уравнения иллюстрируются векторной диаграммой трансформатора. Построение векторной диаграммы удобно начинать с вектора основного потока, амплитуда которого равна:

$$\Phi_m = \frac{E1}{4.44fw1} \approx \frac{U1}{4.44fw1}$$

Этому потоку соответствует, как было сказано ранее, МДС холостого хода, вектор которой опережает по фазе вектор потока на угол δ , определяемый потерями в магнитопроводе. По векторной диаграмме можно проследить взаимосвязь параметров первичной и вторичной цепей трансформатора.

На рис. 2 представлена **векторная диаграмма** трансформатора, работающего под нагрузкой.

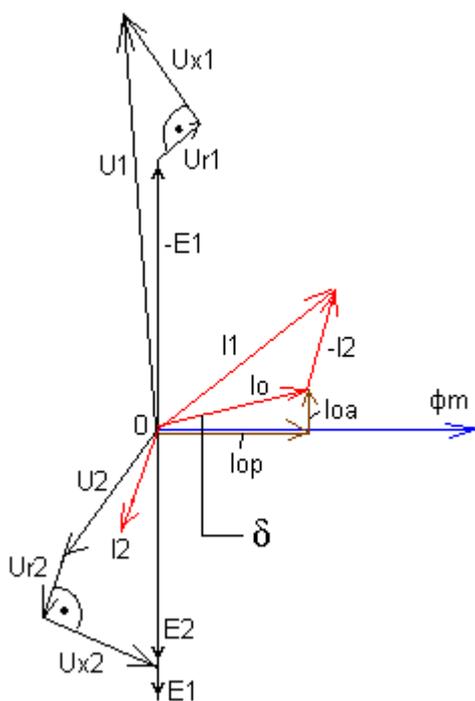


Рис.2.

С целью упрощения расчетов и анализа электромагнитных процессов трансформатора его вторичные параметры приводят к первичным параметрам.

Рассмотрим вместо реального трансформатора эквивалентный ему, так называемый приведенный трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого имеют одинаковое число витков.

Допустим, что $w_2' = w_1$, но тогда, чтобы электромагнитные процессы в реальном трансформаторе не изменились нужно, чтобы $w_2' = k \cdot w_2$. Таким образом, w_2' есть число витков приведенного трансформатора. Аналогично можно получить остальные параметры вторичного контура приведенного трансформатора. $E_2' = k \cdot E_2$, $U_2' = k \cdot U_2$, $I_2' = I_2 / k$.

Соблюдая равенство активных и реактивных потерь приведенного и реального трансформатора:

$$P_2' = P_2 \text{ и } Q_2' = Q_2,$$

$$\text{т.е. } (I_2')^2 \cdot R_2' = (I_2)^2 \cdot R_2$$

$$\text{и } (I_2')^2 \cdot X_2 \sigma' = (I_2)^2 \cdot X_2 \sigma$$

получим:

$$R_2' = k^2 \cdot R_2 \text{ и } X_2' = k^2 \cdot X_2$$

$$\underline{Z_{H2}'} = k^2 \cdot \underline{Z_{H2}}$$

Схема замещения трансформатора с приведенными вторичными параметрами представлена на рис.3. Способ формирования схемы замещения представлен в предыдущих лекциях по теме: – «Индуктивно-связанные электрические цепи».

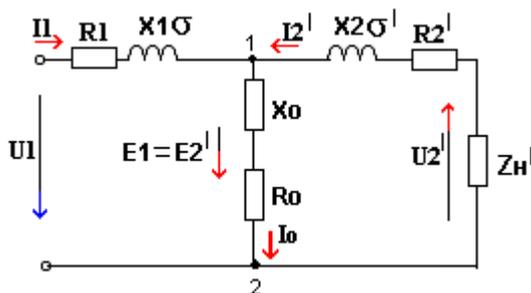


Рис.3

Где: ветвь 1-2 является ветвью намагничивания схемы замещения трансформатора;

Сопротивление X_0 характеризует основной поток трансформатора (Т);

Сопротивление R_0 характеризует потери в стали магнитопровода Т;

Сопротивление R_1 характеризует тепловые потери в первичной обмотке Т;

Сопротивление $X_1\sigma$ характеризует потоки рассеяния первичной обмотки Т;

Сопротивление R_2' характеризует тепловые потери во вторичной обмотке Т;

Сопротивление $X_2\sigma'$ характеризует потоки рассеяния вторичной обмотки Т;

I_0 – ток намагничивания (характеризует основной поток, см. векторную диаграмму трансформатора).

$$I_0 = \sqrt{I_0a^2 + I_0p^2}$$

Активная составляющая тока намагничивания I_0a определяет тепловые потери в стали магнитопровода Т. Реактивная составляющая тока намагничивания I_0p , определяет величину основного потока.

Лекция

Экспериментальное исследование однофазного трансформатора

Опыты холостого хода и короткого замыкания характеризуют работу трансформатора в предельных режимах нагрузки. По результатам этих опытов можно определить параметры его схемы замещения.

Опыт холостого хода трансформатора

На рис. 1 представлена электрическая схема для проведения опыта.

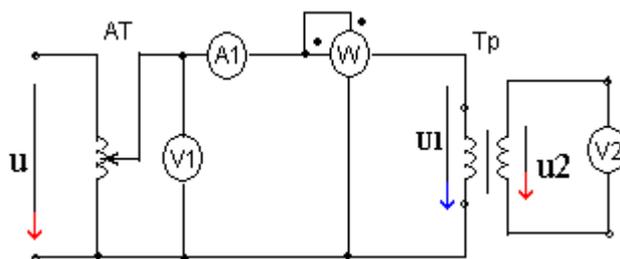


Рис.1

В режиме холостого хода ток в первичной обмотке трансформатора $I_{1хх}$ не превышает 3-10% от номинального тока $I_{1н}$. Активная мощность в этом режиме определяется главным образом потерями в магнитопроводе (потерями в стали), т.к. потери в меди в первичной обмотке незначительны.

По данным опыта холостого хода можно определить параметры цепи намагничивания схемы замещения трансформатора X_0, R_0 (Рис.2).

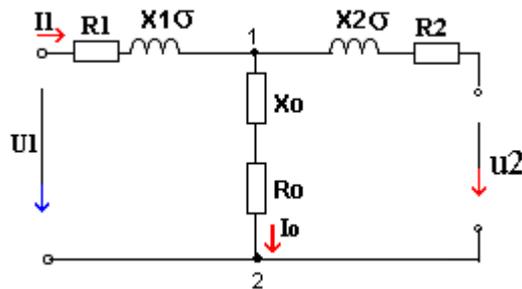


Рис.2

Т.к. $I_0 = I_{1xx}$, а $X_0 \gg X_{1\sigma}$ и $R_0 \gg R_1$, то

$$Z_{1xx} = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = U_1 / I_{1xx} \quad \text{и} \quad R_0 = P_{xx} / (I_{1xx})^2.$$

Примечание: Току I_{1xx} соответствует показание амперметра A_1 ;
 Напряжению U_1 соответствует показание вольтметра V_1 ;
 Напряжению U_2 соответствует показание вольтметра V_2 ;
 Активной мощности P_{xx} соответствует показание ваттметра W .

Из этого опыта можно определить коэффициент трансформации трансформатора.

$$k = V_1 / V_2.$$

Трансформатор с минимальными потерями холостого хода считается лучшим!

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода представлена на рис.3.

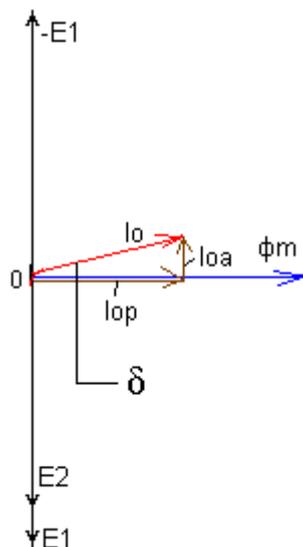


Рис.3

Опыт короткого замыкания трансформатора

Под опытом **короткого замыкания** трансформатора понимается такой режим его работы, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной обмотке подведено такое напряжение $U_{1к}$ при котором ток I_1 в первичной обмотке был бы равен номинальной величине.

В нормальных силовых трансформаторах мощностью 20-10000 кВА напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ составляет 5-10% от номинального значения $U_{1н}$. На рис. 4 представлена электрическая схема для проведения опыта.

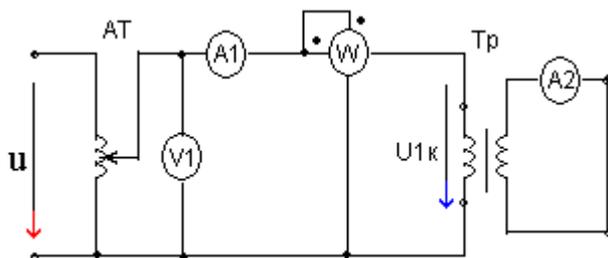


Рис. 4

Из опыта короткого замыкания можно определить суммарные параметры первичной и вторичной обмоток и электрические потери в них.

Т.к. $I_{1кз} = I_{1н}$, а $X_0 \gg X_{1\sigma}$ и $R_0 \gg R_1$, то $I_{1кз} \approx I_{2кз}$, $I_0 \approx 0$

$$Z_{1кз} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2} = \sqrt{(R_{кз})^2 + (X_{кз})^2} = U_{1к} / I_{1кз}$$

и $R_{кз} = P_{кз} / (I_{1кз})^2$.

Примечание: Току $I_{1кз}$ соответствует показание амперметра **A1**;

Току $I_{2кз}$ соответствует показание амперметра **A2**;

Напряжению $U_{1к}$ соответствует показание вольтметра **V1**;

Активной мощности $P_{кз}$ соответствует показание ваттметра **W**.

На рис. 5 представлена схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания, а на рис. 6 – его векторная диаграмма.

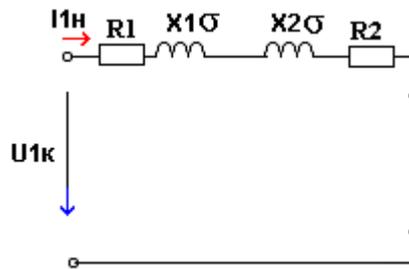


Рис.5

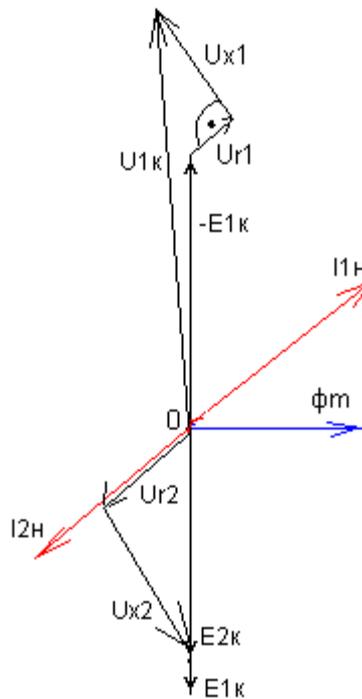


Рис.6

Потери энергии, нагрев и коэффициент полезного действия трансформатора

В работающем трансформаторе, вместе с передачей полезной мощности в нагрузку, в его обмотках и магнитопроводе выделяются, соответственно электрические и магнитные потери. Магнитные потери p_c (потери в стальных пластинах магнитопровода от вихревых токов – потери холостого хода) зависят от частоты тока f , от величины магнитной индукции B в магнитопроводе и от веса магнитопровода.

$$p_c \approx B^2 \approx f^{1.3}$$

На рис. 7 представлена диаграмма мощностей и потерь в трансформаторе, где: **P1**- потребляемая мощность; **P2**- полезная мощность; **p_{э1}**- электрические потери в первичной обмотке; **p_{э2}**- электрические потери во вторичной обмотке.

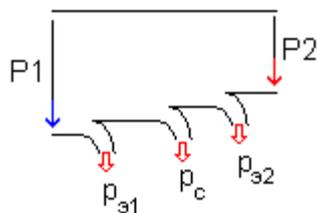


Рис. 7

Уравнение баланса мощностей для трансформатора имеет вид:

$$P1 = P2 + p_{э1} + p_c + p_{э2}$$

Потери холостого хода трансформатора $p_{хх} = p_c$, при неизменном напряжении питания, практически не зависят от нагрузки.

Потери короткого замыкания $p_{кз} = (p_{э1} + p_{э2})$ можно определить по известной формуле: $p_{кз} = I_1^2 \cdot R_{кз}$.

Если обозначить $p_{эс} = p_{э1} + p_{э2} + p_c$, то коэффициент полезного действия трансформатора определится:

$$\eta = \frac{P2}{P1} = \frac{P1 - p_{эс}}{P1} = 1 - \frac{p_{кз} + p_{хх}}{P1}$$

Коэффициент полезного действия (КПД), для трансформаторов различной мощности составляет величину 0.7 - 0.98, при этом большее значение соответствует трансформатору большей мощности (более 1000 кВА).

Если обозначить: коэффициент нагрузки $\beta = I_2/I_{2н}$;

полная номинальная мощность S_n ;

коэффициент мощности нагрузки $\cos(\varphi_2)$;

номинальный ток первичной обмотки $I_{1н}$,

то КПД трансформатора определится из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 \cdot p_{кз} + p_{хх}}{\beta \cdot S_n \cdot \cos(\varphi_2) + \beta^2 \cdot p_{кз} + p_{хх}}$$

Исследуем данную функцию на экстремум, т.е. определим при каком значении β , КПД будет максимальным (процедура в редакторе Mathcad).

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0 \text{ solve, } \beta \rightarrow \left(\frac{\sqrt{p_{xx}}}{\sqrt{p_{k3}}} \right)$$

На рис.8 представлена, в качестве примера, зависимость $\eta = f(\beta)$

для: $S_{2H} = 500 \text{ Вт}$; $p_{k3} = 10 \text{ Вт}$; $p_{xx} = 5 \text{ Вт}$; $\varphi_2 = 60^\circ$.

Здесь $\beta = 0.707$, а $\eta_{\max} = 0.946$

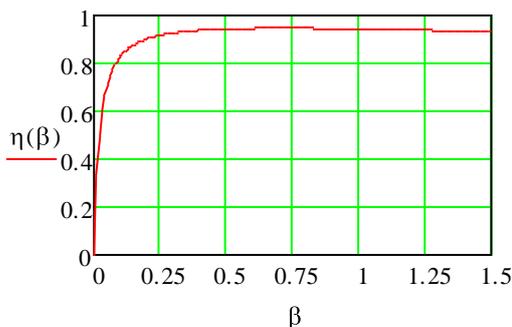


Рис. 8

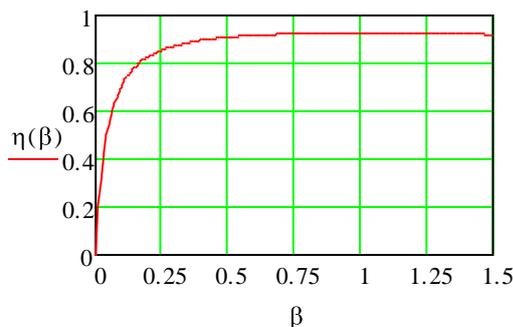


Рис. 9

На рис.9 представлена зависимость $\eta = f(\beta)$

для: $S_{2H} = 500 \text{ Вт}$; $p_{k3} = 10 \text{ Вт}$; $p_{xx} = 10 \text{ Вт}$; $\varphi_2 = 60^\circ$.

Здесь $\beta = 1$, а $\eta_{\max} = 0.926$

Лекция

Конструкция трансформаторов

При конструировании трансформаторов стремятся к снижению его веса и стоимости, уменьшению потерь в магнитопроводе и обмотках. Основными частями трансформатора являются его магнитопровод (сердечник) и обмотки. Сердечник собирается из листов электротехнической стали с целью уменьшения потерь от вихревых токов. Между листами находится лаковая изоляция. Толщина листа – (0.35 – 0.5) мм.

В последнее время широкое распространение получили трансформаторы с ленточными магнитопроводами. Ленты изготавливаются из холоднокатанной электротехнической стали с направлением прокатки – по длине. Ленточные магнитопроводы изготавливаются на специальном станке с последующей термической обработкой.

Обмотки трансформатора изготавливаются из обмоточного материала (медного или алюминиевого изолированного проводника круглого или прямоугольного сечения). Между обмоточным материалом и магнитопроводом прокладывается дополнительная изоляция (электрокартон или другие синтетические композиции).

Обмотки трансформатора могут располагаться на одном и том же стержне сердечника или на разных стержнях. На рис.1 представлена схематическая конструкция однофазного трансформатора с расположением обмоток на одном стержне.

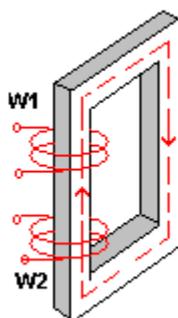


Рис. 1

В энергетических системах и промышленности широкое распространение получили 3-х фазные трансформаторы. На рис. 2 представлена композиция 3-х фазного трансформатора, в виде трёх однофазных.

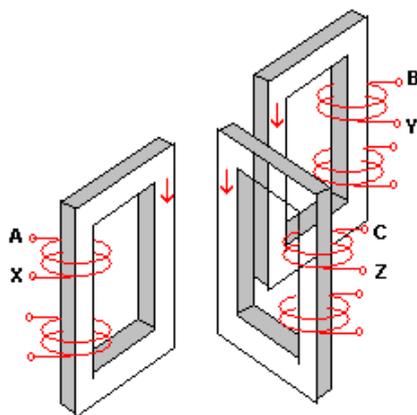


Рис. 2

На рис. 3 представлена схематическая конструкция 3-х фазного трансформатора с единым трёхстержневым сердечником.

Центральный стержень такого 3-х фазного трансформатора имеет большее сечение. Это сделано с целью выравнивания индукции магнитного поля в магнитопроводе.

Магнитопровод с обмотками называют активной частью трансформатора.

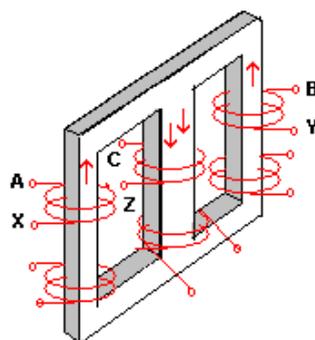


Рис. 3

Трансформаторы, у которых основной изолирующей средой служит воздух, газ или твердый диэлектрик, а охлаждающей средой воздух, называют **сухими**.

Для улучшения электрической изоляции токопроводящих частей и условий охлаждения обмотки вместе с магнитной системой погружают в бак с трансформаторным маслом. Такие трансформаторы называют **масляными**. Баки некоторых трансформаторов вместо масла наполняют негорючей синтетической жидкостью – **совтолом**.

На рис. 4 представлена схематическая конструкция 3-х фазного масляного трансформатора средней мощности, где:

1- активная часть; 2 – стальной бак; 3 – трансформаторное масло; 4 – крышка бака; 5 – выводы обмоток с изоляторами; 6 – расширительный бак с горловиной для заливки масла; 7 – уровень для масла; 8 – выхлопная труба для аварийного сброса масла; 9 – защитная стенка; 10 – радиатор охлаждения.

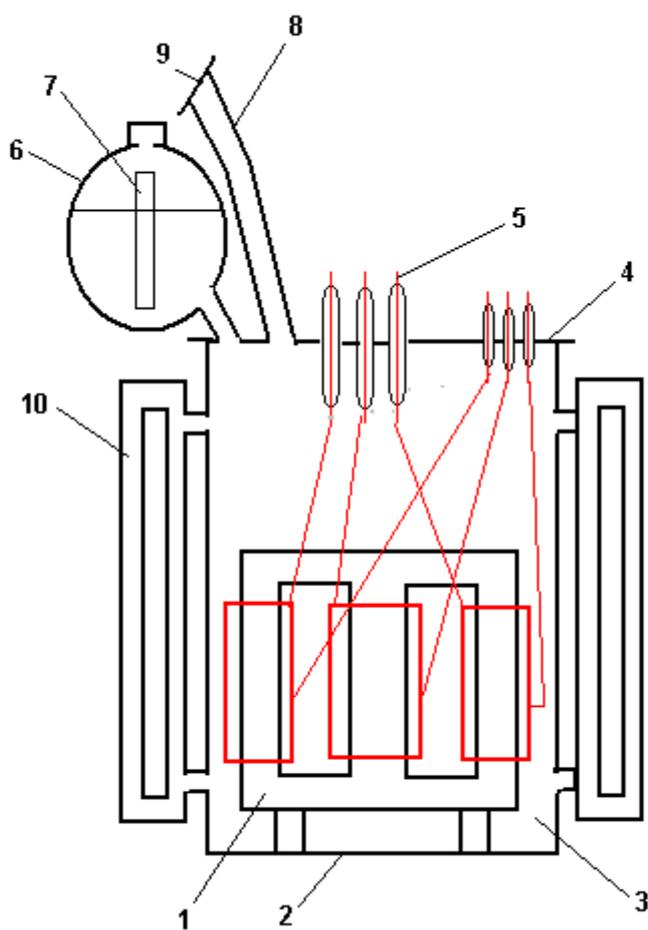


Рис. 4

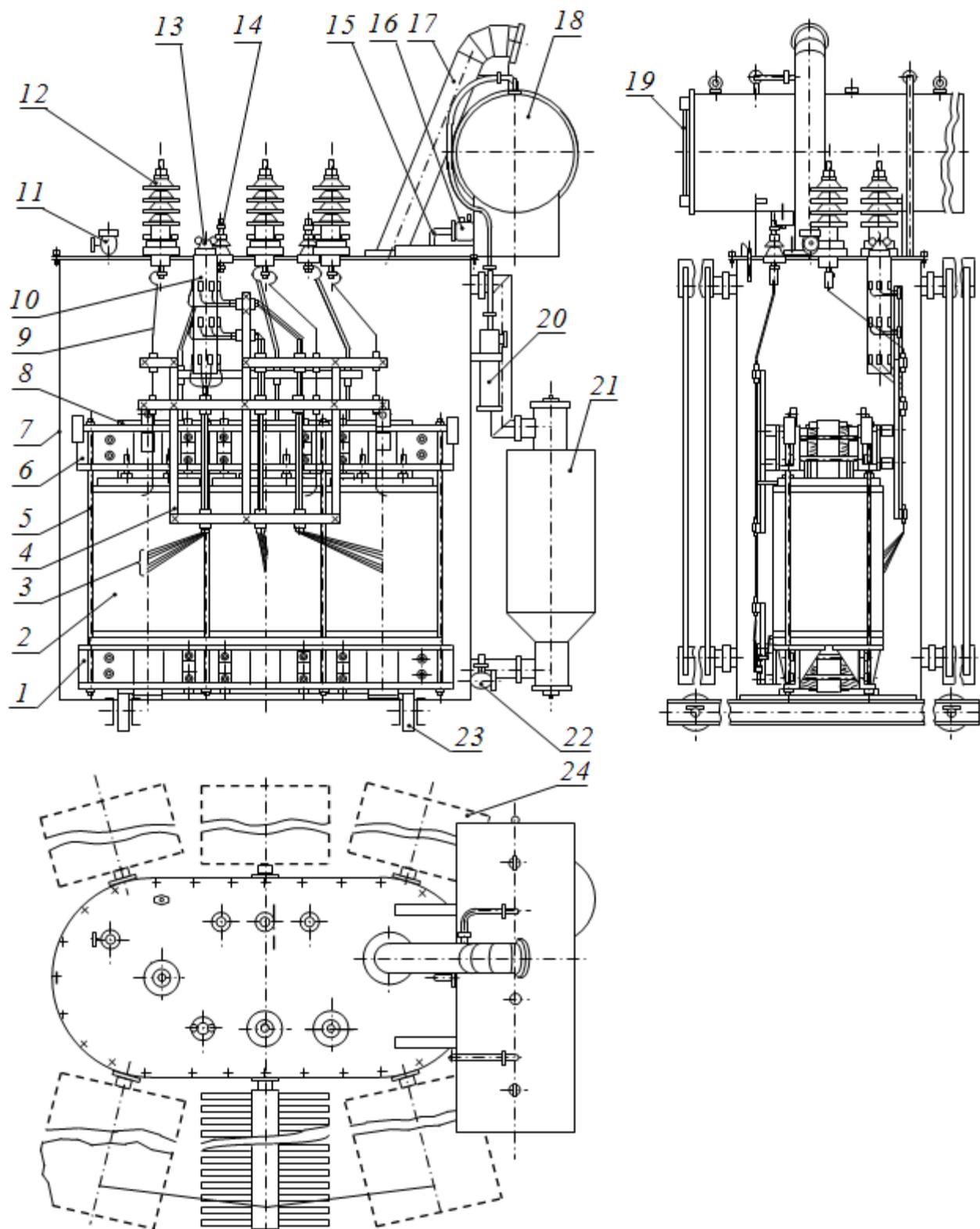


Рис. 4а. Общий вид силового масляного трансформатора общего назначения:

1 – нижняя ярмовая балка; 2 – обмотка ВН; 3 – регулировочные ответвления; 4 – деревянные планки; 5 – вертикальная прессующая шпилька; 6 – верхняя ярмовая балка; 7 – бак; 8 – магнитопровод; 9 – линейный отвод; 10 – переключатель; 11 – кран для заливки масла; 12 – ввод ВН; 13 – привод переключателя; 14 – ввод НН; 15 – маслопро-

вод; 16 – газовое реле; 17 – выхлопная труба; 18 – расширитель; 19 – маслоуказатель; 20 – воздухоосушитель; 21 – термосифонный фильтр; 22 – кран для слива масла; 23 – каток; 24 – радиатор.

Внешний вид силового масляного трансформатора средней мощности рис. 4б.



Рис. 4б.

Трансформаторы силовые *сухие* типов ТС и ТСЗ соответственно на Рис. 4в и Рис. 4г.



Рис. 4в



Рис. 4г.



Рис. 4д. Трансформатор силовой ОСМ 0,16 - Однофазный сухой многоцелевого назначения мощностью 0.16 кВт, с ленточным магнитопроводом.

Группы соединения обмоток 3-х фазного трансформатора

Обмотки 3-х фазного трансформатора могут соединяться в звезду и треугольник. У некоторых 3-х фазных трансформаторов нейтральные точки обмоток, соединённых в звезду выведены на крышку бака.

В зависимости от сдвига по фазе между линейными ЕДС первичной и вторичной обмоток, на одноимённых зажимах, 3-х фазные трансформаторы разделяются на группы соединений. Всего существует 12 групп соединений обмоток. Рассмотрим некоторые из них.

На рис. 5 представлена схема соединения 3-х фазного трансформатора по группе Y/Y -12, а на рис. 6 – её векторная диаграмма. Здесь сдвиг по фазе между **EAB** и **Eab** равен нулю.

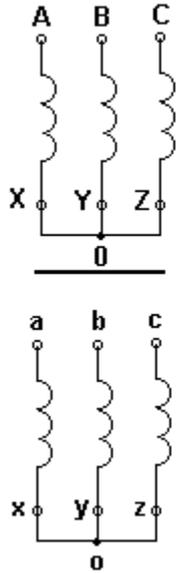


Рис. 5

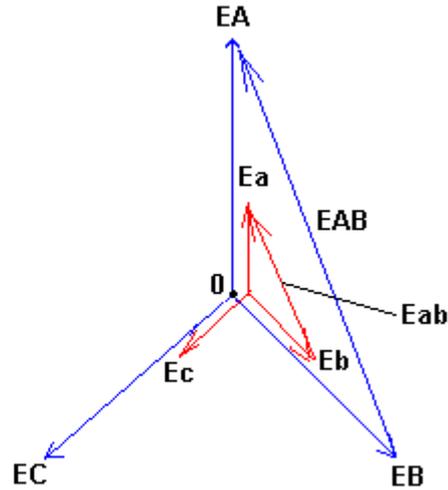


Рис. 6

На рис. 7 представлена схема соединения 3-х фазного трансформатора по группе Y/Y - 6, а на рис. 8 – её векторная диаграмма. Здесь сдвиг по фазе между **EAB** и **Eab** равен 180 градусам.

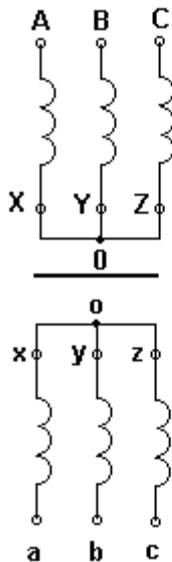


Рис. 7

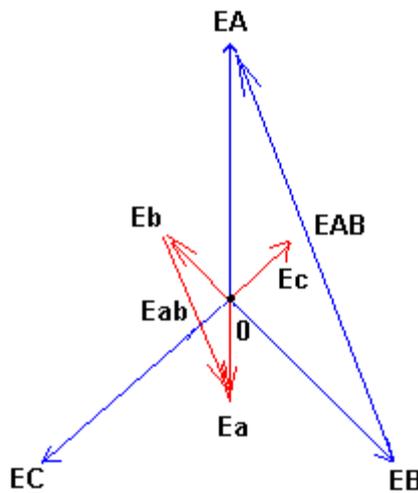


Рис. 8

Параллельная работа трансформаторов

Если необходимо увеличить мощность потребителя устанавливают дополнительный трансформатор и включают его на параллельную работу. На рис. 9 представлена схема включения двух однофазных трансформаторов на параллельную работу, а на рис. 10 – их схема замещения, где: E_{21} ; E_{22} и $Z_{1кз}$; $Z_{2кз}$ - соответственно ЭДС вторичных обмоток трансформаторов и их сопротивления короткого замыкания.

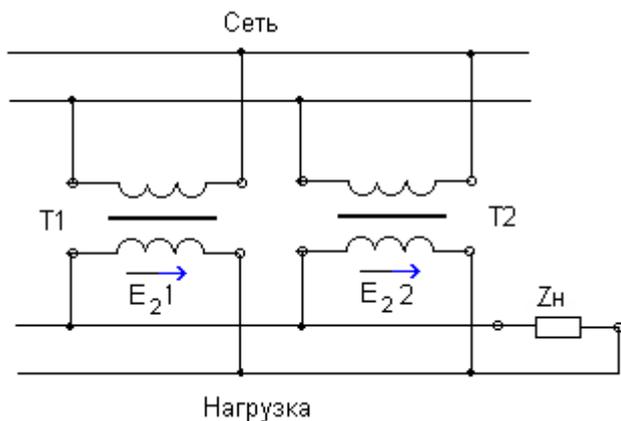


Рис. 9

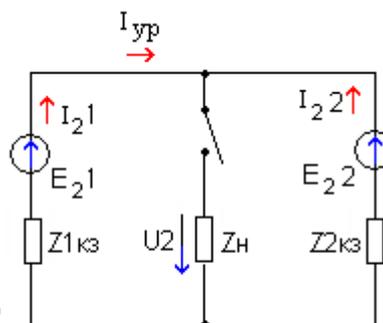


Рис. 10

Условия параллельной работы трансформаторов:

1. Необходимо равенство коэффициентов трансформации трансформаторов;
2. Необходимо равенство напряжений короткого замыкания трансформаторов;
3. Необходимо, чтобы группы соединений трёхфазных трансформаторов были одинаковыми.

При нарушении этих условий даже при отсутствии нагрузки ($Z_{н} = 0$) по обмоткам трансформаторов протекают уравнительные токи, что может привести к повреждению трансформаторов, а в лучшем случае к значительному снижению их КПД. Выражение для уравнительного тока, записанное в комплексной форме.

$$I_{ур} = \frac{E_{21} - E_{22}}{Z_{1кз} + Z_{2кз}}$$

Автотрансформаторы

Автотрансформатор - вариант трансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки соединены между собой, и имеют за счёт этого не только электромагнитную связь, но и электрическую. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные напряжения. Преимуществом автотрансформатора является более высокий КПД, поскольку лишь часть мощности подвергается преобразованию — это особенно существенно, когда входное и выходное напряжения отличаются незначительно. Недостатком является отсутствие электрической изоляции (гальванической развязки) между первичной и вторичной цепью.

На рис. 11 представлена принципиальная схема автотрансформатора, способного регулировать напряжение на выходе вверх и вниз от номинального значения напряжения входа.

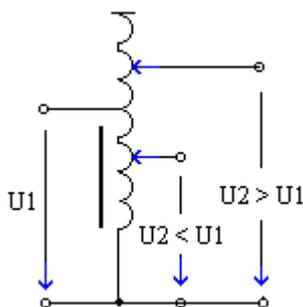


Рис. 11.



Рис. 12.

Лабораторный однофазный автотрансформатор TDGC2-0,5 предназначен для плавного регулирования напряжения *от 0 до 250В* в сети 220В. в частности осветительного, нагревательного, лабораторного и пр. оборудования (рис. 12).

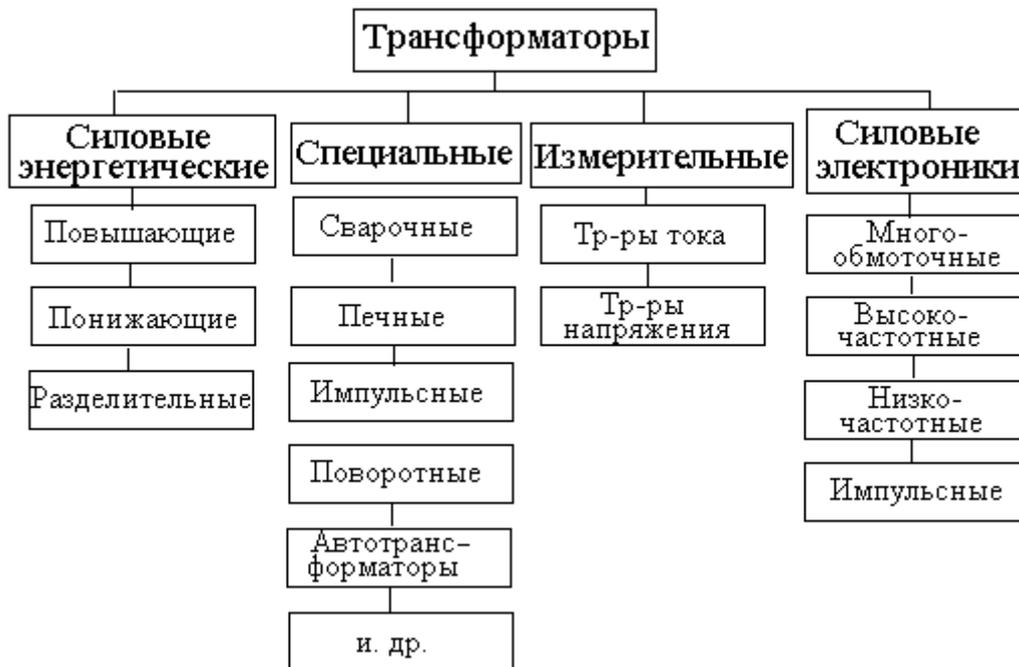


Рис. 13.

Лабораторный трёхфазный автотрансформатор TSGC2-15 предназначен для плавного регулирования напряжения *от 0 до 430В* в сети 380В. в частности осветительного, нагревательного, лабораторного и пр. оборудования (рис. 13).

Существуют и промышленные, мощные автотрансформаторы для различного применения.

Классификация трансформаторов по назначению



Дадим краткую характеристику некоторым видам трансформаторов:

Трансформатор тока

Трансформатор тока - трансформатор, предназначенный для измерения больших токов. Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь с измеряемым переменным током, а во вторичную включаются измерительные приборы. Ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока, пропорционален току, протекающему в его первичной обмотке.

Трансформаторы тока широко используются для измерения электрического тока и в устройствах релейной защиты электроэнергетических систем, в связи с чем на них накладываются высокие требования по точности. Трансформаторы тока обеспечивают безопасность измерений, изолируя измерительные цепи от первичной цепи с высоким напряжением, часто составляющим сотни киловольт.

Трансформатор напряжения

Трансформатор напряжения - трансформатор, предназначенный для преобразования высокого напряжения в низкое. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

Импульсный трансформатор

Импульсный трансформатор - трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с ми-

нимальным искажением формы импульса. Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения, обычно периодически повторяющихся с высокой скважностью. В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к ИТ заключается в неискажённой передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход ИТ напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

Разделительный трансформатор

Разделительный трансформатор - трансформатор, первичная обмотка которого электрически не связана с вторичными обмотками с целью исключения опасности, обусловленной возможностью случайного одновременного прикасания к земле и токоведущим частям или нетокведущим частям, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции.

Пик-трансформатор

Пик-трансформатор - трансформатор, преобразующий напряжение синусоидальной формы в импульсное напряжение с изменяющейся через каждые полпериода полярностью.

Силовой трансформатор

Силовой трансформатор - трансформатор, предназначенный для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии.