

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**В.Б. Баль, С.И. Копылов, М.В. Панихин**

**РАСЧЕТ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Учебное пособие по курсам  
«Электрические машины»,  
«Проектирование электрических машин»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Электротехника и электроэнергетика»

УДК  
621.314

ББК 31.261.8  
Б21

*Утверждено учебным управлением НИУ МЭИ  
в качестве учебного пособия для студентов  
Подготовлено на кафедре электромеханики*

Рецензенты: докт. техн. наук, проф. В.Я. Беспалов  
канл. техн. наук, доцент О.А. Липа

**В.Б. Баль, С.И. Копылов, М.В. Панихин**

Расчет трансформаторов / В.Б. Баль, С.И. Копылов, М.В.Панихин. -  
М.: Издательство МЭИ, 2015. – 40 с.

ISBN

В учебном пособии изложены необходимые теоретические сведения и даны рекомендации для выполнения расчетного задания по курсам «Электрические машины» и «Проектирование электрических машин».

Приведены основные положения по теории трансформаторов, варианты расчетного задания по трансформаторам, необходимые справочные сведения, а также вопросы для контроля знаний.

Пособие предназначаются для студентов, обучающихся по направлению «Электротехника и электроэнергетика».

## ВВЕДЕНИЕ

Трансформатор это индуктивный преобразователь, при помощи которого переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения. Основное назначение трансформаторов изменять напряжение переменного тока. Трансформаторы применяются во всех областях техники, где используется электричество: в электроэнергетических системах, в промышленности, в бытовой технике, в радиотехнике. Диапазон мощностей, применяемых трансформаторов, от микроватт до нескольких гигаватт.

Для передачи и распределения электрической энергии необходимо повысить напряжение генераторов на электростанциях с 16-24 кВ до 110-1150 кВ, используемых в линиях передачи, а затем понизить до напряжения потребителей (220 В – 35 кВ). Для этого используются силовые трансформаторы, выпускаемые мощностью до миллиона киловольт-ампер и на напряжение до 1150-1500 В.

В учебном пособии изложена методика расчета параметров и характеристик силовых трансформаторов, используемая в течение ряда лет на кафедре электромеханики НИУ «МЭИ» студентами электротехнических и электроэнергетических специальностей для выполнения типового расчёта по трансформаторам.

Содержание расчётного задания соответствует программам курсов электрических машин, читаемых кафедрой для Институтов электротехники и электроэнергетики МЭИ (ТУ).

Число и характер пунктов расчетного задания и необходимый объем расчетной работы выбраны так, чтобы тематика задания охватывала наиболее важные вопросы теории трансформаторов и общий объем работы был существенно большим, чем это предусмотрено графиком обязательных заданий. Это позволяет преподавателю составлять задание для каждой группы или для каждого студента с использованием части пунктов, расчетного задания в соответствии с профилем факультета и специальности и с объемом, установленным графиком.

Для каждого студента обязательно выполнение тех пунктов расчетного задания, которые будут указаны лектором потока или преподавателем, ведущим занятия.

Основными учебными пособиями являются учебники [1-3]. При выполнении расчетов можно пользоваться книгой [4].

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Трансформатор (рис.1.1а) состоит из двух (а иногда и большего числа) взаимно неподвижных обмоток, расположенных на ферромагнитном магнитопроводе. Обмотки имеют между собой магнитную связь, осуществляемую переменным магнитным полем. Ферромагнитный магнитопровод служит для усиления магнитной связи между обмотками.

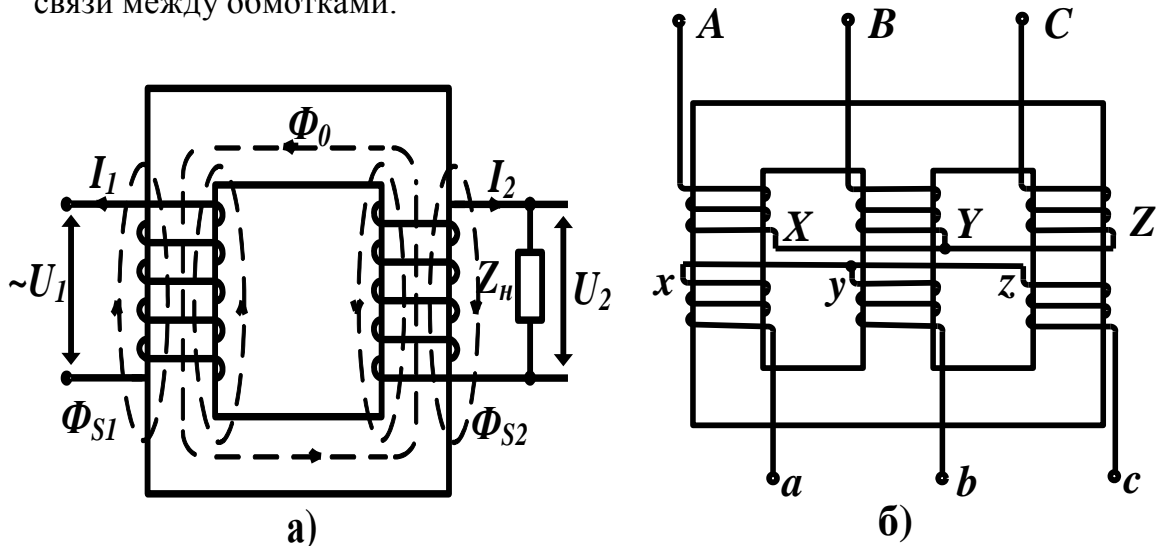


Рис. 1.1. Двухобмоточный однофазный трансформатор (а), трёхфазный трансформатор (б)

Трансформатор имеет не меньше двух обмоток; из них первичной обмоткой называется обмотка, которая получает энергию от источника переменного напряжения  $U_1$  (рис.1.1а). Вторичная обмотка которые отдают энергию преобразованного переменного тока.

На рис.1.1а изображена принципиальная схема включения трансформатора, на которой для ясности первичная и вторичная обмотки помещены на разных стержнях стального магнитопровода. В действительности каждая обмотка размещается на обоих стержнях так, что половины двух обмоток находятся на левом, а вторые половины - на правом стержне.

Обмотка трансформатора, потребляющая энергию из сети, называется первичной обмоткой, а обмотка отдающая энергию в сеть, - вторичной.

Обмотки трансформатора подключаются к сетям с различными напряжениями. Обмотка, предназначенная для присоединения к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой высшего

напряжения (ВН), а подсоединяемая к сети с меньшим напряжением, - обмоткой низшего напряжения (НН). Если напряжение вторичной обмотки меньше напряжения первичной обмотки, то трансформатор называется понижающим, а если больше – повышающим. В зависимости от включения тех или иных обмоток к сети каждый трансформатор может быть как повышающим, так и понижающим.

Трансформаторы с двумя обмотками называются двухобмоточными. В зависимости от числа фаз трансформаторы подразделяются на однофазные, трехфазные и многофазные.

В трехфазном стержневом трансформаторе обмотки каждой фазы размещаются на своем стержне (рис. 1.1б); стержни вместе с ярами образуют замкнутую магнитную систему.

По способу охлаждения в зависимости от охлаждающей среды трансформаторы подразделяются на сухие (с воздушным охлаждением), масляные и заполненные негорючим жидким диэлектриком.

При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока по этой обмотке протекает ток, создающий в магнитопроводе трансформатора магнитодвижущую силу (МДС)  $F_1$  равную произведению величины тока  $I_1$  на число витков  $w_1$  первичной обмотки трансформатора ( $F_1 = I_1 w_1$ ). МДС возбуждает магнитный поток  $\Phi$  в магнитопроводе трансформатора, который по закону Ома для магнитной цепи равен, Вб,

$$\Phi = F_1 \lambda_m,$$

где  $\lambda_m$  – магнитная проводимость магнитной цепи трансформатора.

Большая часть магнитных линий замкнется по стальному магнитопроводу, образуя основной магнитный поток  $\Phi_o$ , который пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток (рисунок 1а). Некоторая часть магнитных линий замкнется по немагнитной среде, образуя поток рассеяния первичной обмотки  $\Phi_{s1}$ . Магнитные линии потока рассеяния пронизывают витки только первичной обмотки и в процессе трансформирования энергии участия не принимают. При нагрузке трансформатора в его вторичной обмотке протекает ток  $I_2$ , возбуждающий свое магнитное поле. Так как основной магнитный поток в магнитопроводе трансформатора сцеплен со всеми витками первичной и вторичной обмоток, то он определяется суммой МДС этих обмоток. Часть магнитных линий поля, возбуждаемого током вторичной обмотки, замкнется через немагнитную среду, образуя

поток рассеяния вторичной обмотки  $\Phi_{s2}$ . Этот магнитный поток не взаимодействует с потоком первичной обмотки.

Магнитный поток трансформатора  $\Phi_0$  индуцирует в обмотках трансформатора переменные ЭДС:  $E_1 = w_1 d\Phi_0/dt$  и  $E_2 = w_2 d\Phi_0/dt$  ( $w_1$  и  $w_2$  - числа витков первичной и вторичной обмоток). ЭДС первичной обмотки  $E_1$  направлена встречно приложенному напряжению  $U_1$ , так как по закону Ленца ЭДС препятствует изменению тока. Ток первичной обмотки также направлен против ЭДС и согласно напряжению  $U_1$ . Во вторичной обмотке ток  $I_2$  всегда направлен согласно ЭДС  $E_2$ , так как в цепи вторичной обмотки она является единственным источником напряжения. ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  имеют одно направление, так как индуцируются одним и тем же магнитным потоком магнитопровода. Из-за этого, токи обмоток  $I_1$  и  $I_2$ , а значит и МДС обмоток, всегда направлены встречно. Разность МДС обмоток трансформатора равна падению МДС в его магнитопроводе, которое определяет ток намагничивания трансформатора  $I_\mu$  (реактивная часть тока холостого хода трансформатора). МДС магнитопровода трансформатора и, следовательно, ток намагничивания, тем больше, чем больше насыщение магнитопровода и величина паразитных зазоров между частями магнитопровода.

Для расчета трансформатора используются следующие расчётные соотношения. Действующие значения ЭДС обмоток, В,

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 \Phi_{\max} f_1 w_1 \\ E_2 &= 4,44 \Phi_{\max} f_1 w_2, \end{aligned}$$

где  $\Phi_{\max}$  - максимальное (пиковое) значение магнитного потока магнитопровода,  $f_1$  - частота напряжения сети.

Максимальное значение основного магнитного потока, Вб,

$$\Phi_{\max} = B_{\max} Q_{\text{ст}} k_c,$$

где  $B_{\max}$  - максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода,  $Q_{\text{ст}}$  - площадь поперечного сечения стержня,  $k_c$  - коэффициент заполнения магнитопровода сталью, который при толщине пластин 0,5 мм принимают равным 0,95.

Коэффициент трансформации равен отношению ЭДС обмотки высшего напряжения трансформатора к ЭДС обмотки низшего напряжения, и также равен отношению чисел витков этих обмоток:

$$k_T = E_1/E_2 = w_1/w_2$$

Полная мощность первичной обмотки трансформатора или полная мощность потребляемая трансформатором из сети, кВА,

$$S_1 = U_1 I_1$$

где  $U_1$ - напряжение сети.

Полная мощность вторичной обмотки трансформатора или полная мощность отдаваемая трансформатором в нагрузку, кВА,

$$S_2 = U_2 I_2$$

где  $U_2$ - напряжение вторичной обмотки.

Потери в трансформаторах невелики. В больших трансформаторах потери составляют менее одного процента. Поэтому, без большой потери точности можно принять, что полная номинальная мощность трансформатора равна, кВА,

$$S_n = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

В общем случае в трансформаторе число витков в первичной и вторичной обмотках неодинаково ( $w_2 \neq w_1$ ), что затрудняет анализ трансформаторов посредством схем замещения и векторных диаграмм. Поэтому при анализе используют приведенный трансформатор. Приведенным называют трансформатор, у которого  $w_2 = w_1$  и параметры вторичной обмотки пересчитаны таким образом, что мощность на каждом элементе вторичной цепи такая же, как и в реальном трансформаторе. Параметры вторичной обмотки, приведенные к числу витков первичной обмотки, имеют обозначение с верхним индексом “штрих”.

Уравнения приведённого трансформатора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' z_2 = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2' \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0, \end{aligned}$$

где  $r_1, x_1, z_1$  и  $r_2', x_2', z_2'$ -соответственно активные, реактивные и полные сопротивления первичной и вторичной обмоток,  $\dot{I}_0$ - ток холостого хода трансформатора. Сопротивления  $x_1$  и  $x_2'$  обусловлены потоками рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора:  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$  (рисунок 1а).

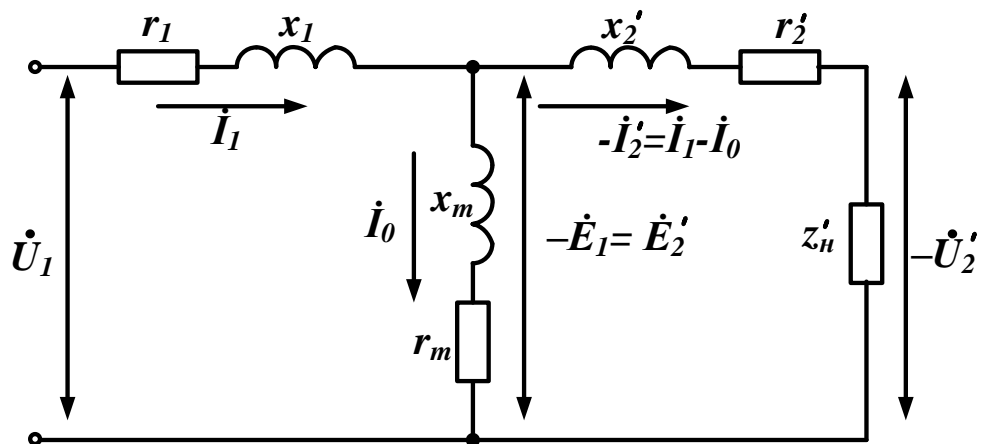


Рис. 1.2. Схема замещения приведённого трансформатора

Схема замещения приведённого трансформатора представлена на рис. 1.2. На схеме ЭДС обмоток  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2'$  имитируются падением напряжения в центральной ветви  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2' = \dot{I}_0 z_m = \dot{I}_0 r_m + j \dot{I}_0 x_m$ , где  $r_m$ ,  $x_m$ ,  $z_m$  соответственно активное, реактивное и полное сопротивление центральной ветви. Сопротивление  $z_m = r_m + j x_m$  называют сопротивлением намагничивающего контура схемы замещения. Действительная часть  $r_m$  - это условное активное сопротивление, на котором выделяется мощность, равная потерям в стали трансформатора, т.е.  $r_m = P_{ст}/I_0^2$ . Мнимая часть  $x_m$  - это индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмоток трансформатора, пропорциональное магнитной проводимости его магнитопровода. Сопротивление  $z_n$  на рис. 1.2 – сопротивление нагрузки.

ЭДС вторичной обмотки приведённого трансформатора:  $z_n$ , В,

$$E_2' = E_2 w_1 / w_2 = k_T E_2 = E_1$$

Из условия равенства полных мощностей вторичной цепи приведённого и реального трансформаторов  $I_2' E_2' = I_2 E_2$ ,

можно получить ток вторичной цепи приведённого трансформатора, А,

$$I_2' = (E_2 / E_2') I_2 = I_2 / k_T$$



Из условия равенства активных, реактивных и полных мощностей сопротивлений вторичной цепи приведённого и реального трансформаторов можно получить приведённые сопротивления вторичной цепи, Ом,

$$\begin{aligned} r_2' &= k_T^2 r_2 \\ x_2' &= k_T^2 x_2, \\ z_2' &= k_T^2 z_2 \\ z_H' &= k_T^2 z_H. \end{aligned}$$

По уравнениям приведённого трансформатора можно построить векторную диаграмму, которая наглядно показывает соотношения между токами, ЭДС и напряжениями. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке приведена на рис. 1.3.

**Порядок построения векторной диаграммы.** Проводится произвольно вектор магнитного потока  $\dot{\Phi}_m$ . В том же направлении

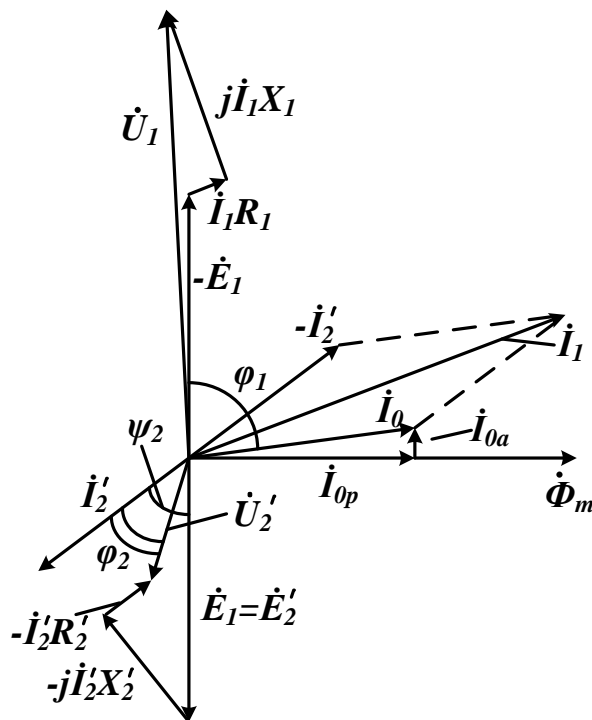


Рис.1.3. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

откладывается расчётное значение вектора реактивной составляющей тока холостого хода  $\dot{I}_{0p}$  (тока намагничивания  $\dot{I}_\mu$ ), от конца которого в перпендикулярном направлении проводится вектор активной составляющей тока холостого хода  $\dot{I}_{0a}$ . Результирующий вектор тока холостого хода  $\dot{I}_0$  проводят от начала координат к концу вектора  $\dot{I}_{0a}$ . Перпендикулярно к магнитному потоку  $\dot{\Phi}_m$  проводятся вектора ЭДС ( $-\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ ), которые отстают на  $90^\circ$  от магнитного потока  $\dot{\Phi}_m$ . Далее, определив величину тока,  $A$ ,

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(r'_H + r'_2)^2 + (x'_H + x'_2)^2}},$$

откладывают вектор  $I'_2$  под углом  $\psi_2$ , который находим по формуле

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}.$$

Согласно уравнению  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$  строим вектор  $\dot{I}_1$ , как геометрическую сумму векторов  $\dot{I}_0$  и  $(-\dot{I}'_2)$ .

По уравнению  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$  находим вектор  $\dot{U}_1$ . Рассчитываем амплитуды векторов  $j\dot{I}_1 x_1$  и  $\dot{I}_1 r_1$ . От конца вектора  $-\dot{E}_1$  откладываем вектор  $\dot{I}_1 r_1$ , параллельно вектору тока  $\dot{I}_1$ , и вектор  $j\dot{I}_1 x_1$ , перпендикулярно вектору тока  $\dot{I}_1$ . Вектор  $\dot{U}_1$  проводим от начала координат до конца вектора  $j\dot{I}_1 x_1$ .

По уравнению  $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2$  находим вектор  $\dot{U}'_2$ . Рассчитываем амплитуды векторов  $j\dot{I}'_2 x'_2$  и  $\dot{I}'_2 r'_2$ . От конца вектора  $\dot{E}'_2$  откладываем вектор  $j\dot{I}'_2 x'_2$ , перпендикулярно вектору тока  $\dot{I}'_2$ , и вектор  $-\dot{I}'_2 r'_2$ , параллельно вектору тока  $\dot{I}'_2$ . Вектор  $\dot{U}'_2$  проводим от начала координат до конца вектора  $\dot{I}'_2 r'_2$ .

Меняя значения  $z_H$ , с помощью векторной диаграммы можно построить внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$  и зависимость  $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ .

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  (рисунок 4).

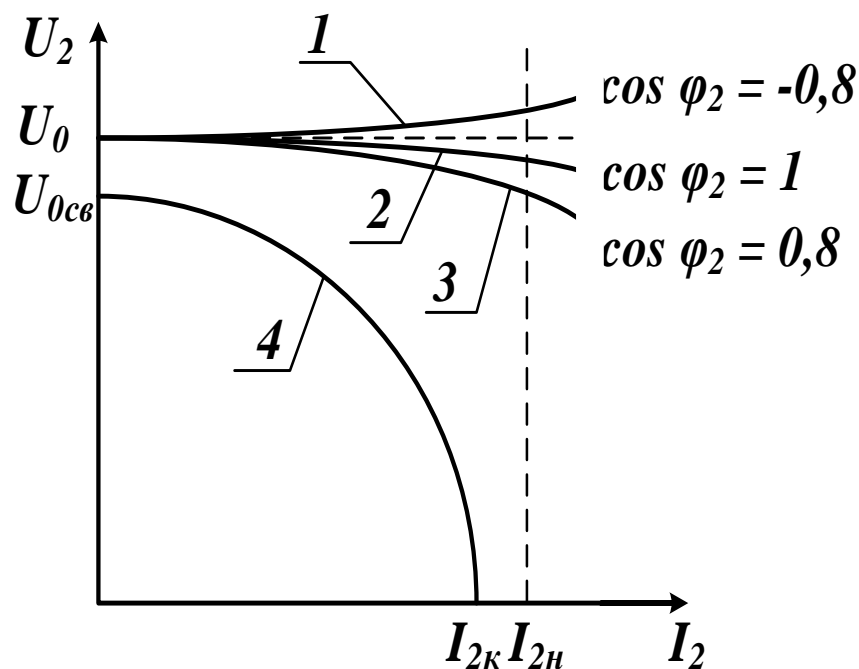


Рис. 1.4. Внешние характеристики трансформатора: 1 – нагрузка активно-емкостная; 2 – чисто активная; 3 – активно-индуктивная; 4 – внешняя характеристика сварочного трансформатора

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P},$$

где  $P_2$  – мощность, отдаваемая (полезная) вторичной обмоткой;  $P_1$  – мощность подведенная (затраченная) к первичной обмотке. Разность между подведенной и отдаваемой мощностями является потерями мощности, Вт,

$$P_1 - P_2 = \Sigma P_{\text{потерь}}$$

Потери мощности в трансформаторе делятся на магнитные  $P_{\text{маг}}$  (то же, что потери в стали  $P_{\text{ст}}$ ) и электрические  $P_{\text{эл}}$ .

Магнитные потери – это потери мощности в магнитопроводе на гистерезис  $P_{\text{г}}$  и на вихревые токи  $P_{\text{вт}}$ , Вт,

$$P_{\text{маг}} = P_{\text{ст}} = P_{\text{г}} + P_{\text{вт}} = P_0$$

Потери в стали называют, также, потерями холостого хода -  $P_0$ , так как потери в опыте холостого хода практически равны потерям в стали. Электрические потери в опыте холостого хода малы, и ими можно пренебречь. Потери в стали являются постоянными потерями трансформатора, так как они не зависят от нагрузки трансформатора.

Электрические потери – это потери, связанные с нагревом обмоток трансформатора. Электрические потери двухобмоточного трансформатора можно определить, если известны активные сопротивления обмоток трансформатора и токи обмоток, Вт,

$$P_{эл} = P_{эл1} + P_{эл2} = m I_1^2 r_1 + m I_2^2 r_2,$$

где  $m$  – число фаз трансформатора.

Электрические потери называют, также, потерями короткого замыкания –  $P_k$ , так как потери в опыте короткого замыкания практически равны электрическим потерям. Потери в стали в опыте короткого замыкания малы, и ими можно пренебречь. Потери короткого замыкания являются переменными потерями трансформатора, так как они зависят от нагрузки трансформатора. , Вт,

$$P_{эл} = \beta^2 P_{элн}$$

где  $P_{элн}$  - электрические потери в номинальном режиме,  $\beta$ -коэффициент нагрузки трансформатора.

$$\beta = I_1 / I_{1н} = I_2 / I_{2н}$$

Полезную мощность можно определить по формуле, Вт,

$$P_2 = m U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

КПД трансформатора при любой нагрузке можно определить по выражению:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{элн}}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{элн}}$$

Максимальное значение КПД соответствует такой нагрузке, когда магнитные потери равны электрическим потерям, Вт,

$$P_0 = \beta^2 P_{\text{элн}} \text{ откуда } \beta = \sqrt{P_0/P_{\text{элн}}}$$

Зависимость коэффициента полезного действия от коэффициента нагрузки  $\eta = f(\beta)$  представлена на рис. 1.5.

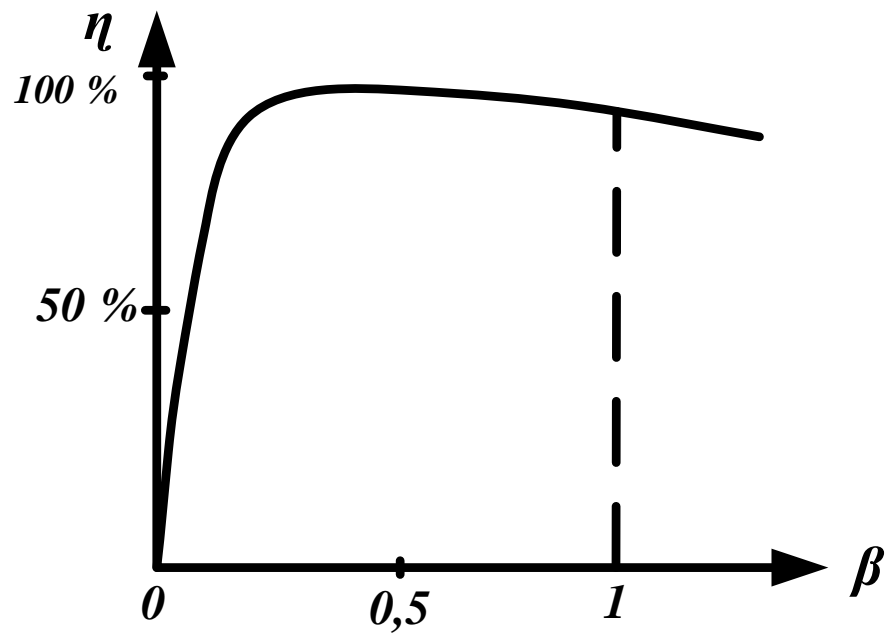


Рис. 1.5 Зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки

## 2. РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ И АВТОТРАНСФОРМАТОРАМ

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора №... из табл. 2.3, принимая первичной обмоткой обмотку ВН:

1. Определить фазные значения номинального напряжения, а также номинальный ток и его фазные значения на сторонах ВН и НН, и коэффициент трансформации (для средней ступени напряжению ВН).

2. Вычертить в масштабе эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток. Вычертить схемы соединения обмоток, обеспечивающие получение заданной группы соединения.

3. Определить:

а) массы стали стержней и ярм, потери холостого хода  $P_x$ , среднее (среднее арифметическое для трех фаз) значение тока холостого хода  $i_0$  и его активной  $i_{0a}$  и реактивной  $i_{0p}$  составляющих, а также  $\cos\varphi_0$  – все величины для номинального значения напряжения  $U_{ном}$  при  $f=50$  Гц;

б) приведенные к первичной обмотке параметры схемы замещения  $r_0$ ,  $x_0$  и  $z_0$  в Омах при  $U=U_{ном}$ ;

в) рассчитать и построить характеристики холостого хода:  $P_x=f(U)$ ;  $I_0=f(U)$  и  $\cos\varphi_0=f(U)$ , а также графики  $I_{0a}=f(U)$  и  $I_{0p}=f(U)$  для диапазона значений  $U$  от 50 до 110% от  $U_{ном}$ ;

г) определить потери холостого хода трансформатора при включении в сеть с частотой 40 Гц и 60 Гц.

4. Определить:

а) потери короткого замыкания  $P_k$ ;

б) приведенные к первичной обмотке составляющие сопротивления короткого замыкания,  $r_k$ ,  $x_k$  и  $z_k$  в Омах; составляющие напряжения короткого замыкания  $u_{ка}$  и  $u_{кр}$ , напряжение короткого замыкания  $u_k$  в процентах и;  $\cos\varphi_k$

в)... рассчитать и построить график изменения вторичного напряжения трансформатора  $\Delta U=f(\cos\varphi_2)$  при номинальном токе. Определить  $\cos\varphi_2$ , при котором  $\Delta U$  принимает максимальное значение. Построить на одной диаграмме внешнюю характеристику  $U_2=f(I_2)$  и график  $\Delta U=f(I_2)$  при  $\cos\varphi_2=1$  и  $\cos\varphi_2=0,7$ .

5. Построить в масштабе приведенную векторную диаграмму:

а) для одной фазы трансформатора при активно-индуктивной нагрузке номинальным током и  $\cos\varphi_2=0,8$ ;

б) то же при емкостной нагрузке  $\cos(-\varphi_2)=0,0$ .

6.а) Рассчитать и построить зависимость КПД от нагрузки  $\eta = f(P_2)$  при  $\cos\varphi_2=1$  и  $\cos\varphi_2=0,7$ . Определить  $P_2$ , при котором  $\eta$  приобретает максимальное значение;

б) рассчитать среднесуточный КПД для графика нагрузки №... из табл. 1 при  $\cos\varphi_2=0,9$ .

7. Для трехобмоточного трансформатора №... из табл. 2.2:

а) рассчитать фазные напряжения, линейные и фазные токи обмоток;

б) найти параметры схемы замещения  $x_1, x_2, x_3, r_1, r_2, r_3, z_1, z_2, z_3$ , приведенные к обмотке ВН;

Таблица 2.1

Графики суточной нагрузки трансформаторов (от номинальной мощности трансформатора, %)

№	Часы суток											
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
1	10	10	10	10	100	100	50	100	100	10	10	10
2	20	20	20	20	100	100	100	70	100	100	100	20
3	60	60	60	60	100	100	80	100	100	100	100	60
4	20	20	20	20	40	10	10	10	100	100	70	50
5	10	10	10	10	30	50	30	60	100	100	70	70
6	40	20	20	100	100	80	80	100	100	100	80	60
7	30	30	50	50	50	40	40	50	100	100	80	50

Таблица 2.2

**Основные данные силовых трехфазных трехобмоточных трансформаторов с масляным охлаждением**

№	Основные данные				Характеристики							
	Мощность кВА	Напряжения обмоток, кВ			Короткое замыкание						Холостой ход	
											потери, кВт	ток, %
		S	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	Потери, кВт			Напряжения короткого замыкания, %			P <sub>x</sub>
P <sub>к12</sub>	P <sub>к23</sub>					P <sub>к13</sub>	U <sub>к12</sub>	U <sub>к23</sub>	U <sub>к13</sub>			
1	6300	115	38,5	11,0	52	50	46	10,5	17,0	6,0	12,5	1,10
2	10000	115	38,5	11,0	76	75	60	10,5	17,5	6,5	17,0	1,10
3	16000	115	38,5	11,0	100	105	90	10,5	17,5	6,5	21,0	0,8
4	25000	115	38,5	11,0	140	130	120	10,5	17,5	6,5	28,5	0,7
5	40000	115	38,5	11,0	200	220	150	10,5	17,5	6,5	39,0	0,6
6	63000	115	38,5	6,6	290	280	260	10,5	18,0	7,0	53,0	0,55
7	80000	115	38,5	6,6	365	380	320	10,5	18,5	7,0	64,0	0,5
8	16000	158	38,5	6,6	96	100	90	10,5	18,0	6,0	21,0	1,0
9	25000	158	38,5	11,0	145	140	120	10,5	18,0	6,0	29,0	0,9
10	32000	158	38,5	11,0	185	180	165	10,5	18,0	6,0	44,0	0,8
11	63000	158	38,5	11,0	285	240	220	10,5	18,0	6,0	56,0	0,7
12	25000	230	38,5	6,6	130	135	105	12,5	20,0	6,5	45,0	0,9
13	40000	230	38,5	11,0	220	200	170	12,5	22,0	9,5	54,0	0,55
14	63000	230	38,5	11,0	320	300	280	12,5	24,0	10,5	75,0	1,0



**Примечания:** 1. Схемы и группы соединений всех трансформаторов таблицы  $Y_n/Y_n/\Delta-0-11-11$ .

2. Номинальные мощности обмоток ВН, СН и НН всех трансформаторов относятся как 100:100:100.

в) найти напряжения на зажимах вторичных обмоток СН и НН при первичной обмотке ВН, обмотке ОН, нагруженной номинальным током при  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и разомкнутой обмотке НН;

г) построить приведенную векторную диаграмму для одной фазы трансформатора при нагрузке обеих вторичных обмоток СН и НН номинальными токами при  $\cos \varphi_2 = 0,9$  и  $\cos \varphi_3 = 0,6$ .

8. Для трехфазного автотрансформатора №... из табл. 2.4 определить:

а) фазные напряжения, линейные и фазные номинальные токи обмоток ВН и НН;

б) электромагнитную (расчетную) мощность автотрансформатора и отношение этой мощности к проходной;

в) установившийся ток короткого замыкания для обмоток ВН и НН;

г) коэффициент полезного действия при работе обмоток ВН и НН при  $\beta = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

9. Заданный трансформатор включается на параллельную работу с трансформатором, имеющим те же номинальные мощность и напряжения, группу и схему соединения и другие параметры, а напряжение короткого замыкания на 10% выше, чем у заданного трансформатора:

а) найти распределение общего тока нагрузки между трансформаторами при изменении общей нагрузки от 0 до  $S'_{ном} + S''_{ном}$ , где  $S'_{ном}$  и  $S''_{ном}$  – номинальные мощности трансформаторов;

б) определить максимальную допустимую мощность установки при условии, что ни один из трансформаторов не должен перегружаться сверх своей номинальной мощности;

в) найти распределение общего тока нагрузки и уравнивающий ток между двумя трансформаторами при нагрузке  $S' = S'_{ном} + S''_{ном}$  в том случае, если заданный трансформатор ошибочно включен в

Таблица 2.3

**Основные данные трехфазных двухобмоточных трансформаторов с естественным масляным охлаждением  
с алюминиевыми (№ 1—18) и медными (№ 19—32) обмотками**

№ пп	Общие данные		Обмотки								Магнитная система				Бак		Контрольные				Напряжение нулевой последовательности %					
	Мощность S, кВт×А	Схемы и группы соединений	ВН	НН	Число витков	Сечение витка, мм2	ВН	НН	Внутренний диаметр D <sub>1</sub> см	Радиальные размеры, см	ВН	НН	Канал между обмотками ВН и НН a <sub>12</sub> . см	Высота обмотки l <sub>1</sub> = l <sub>2</sub> , см	Диаметр стержня d, см	Активное сечение, см <sup>2</sup>	ярмо стержень П <sub>С</sub>	ярмо стержень h <sub>я</sub> h <sub>с</sub>	Высота, см	Расстояние между осями С, см		Масса масла, кг	Масса бака, кг	Р <sub>к</sub> , Вт	Р <sub>х</sub> , Вт	u <sub>к</sub> ,%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	63	Y/Y-0	3300	230	710	49	9,1	84,5	11,9	3,5	1,4	1,4	40	11	80,6	92,4	44	10,5	26	170	80	1280	265	4,5	2,8	50
2	63	Y/Y-0	6000	420	1260	88	4,7	44,5	11,9	3,8	1,25	1,25	40	11	80,6	92,4	43,5	10,5	25	170	80	1280	265	4,5	2,8	50
3	63	Y/Y-0	10000	400	2100	84	2,83	46,8	11,9	3,75	1,3	1,3	39,5	11	80,6	92,4	43,4	10,5	25,5	170	80	1280	265	4,5	2,8	50
4	100	Y/Y-0	3300	230	605	42	10,9	192,5	12,4	3,15	2,2	1,1	49,5	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
5	100	Y/Y-0	6000	440	1125	82	5,43	99,6	12,5	3	2,2	1,2	49	11,5	90,2	107,9	53	11,5	26,5	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
6	100	Y/Δ-11	6300	400	1180	130	5,75	63,4	12,5	3,1	2,3	1	49	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26,5	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
7	100	Y/Y-0	10000	400	1850	74	3,52	110,8	12,3	3,25	2,1	1	50	11,5	90,2	107,9	53,5	11,5	26	210	150	1970	365	4,5	2,6	50
8	160	Y/Y-0	3000	230	394	30	20,7	235,6	14,8	3,7	2,7	0,9	46,5	14	134,2	141,1	51,5	13,5	30,7	295	220	2650	565	4,5	2,4	50
9	160	Δ/Y-11	3300	690	730	88	10,85	77,5	15	3,6	2,8	0,9	47	14	134,2	141,1	52	13,5	31,5	295	220	2650	565	4,5	2,4	50
10	160	Y/Δ-11	6000	690	770	152	10,25	44,8	14,7	3,85	2,50	1	47	14	134,2	141,1	51,5	13,5	31	295	225	2650	565	4,5	2,4	50
11	160	Y/Y-0	10000	400	1273	51	6,15	132,6	14,8	3,95	2,45	0,95	46,5	14	134,2	141,1	51,5	13,5	30,7	295	225	2650	565	4,5	2,4	50
12	250	Y/Y-0	3300	230	358	25	33,5	348	16	4,5	2,5	1	55	15	155,1	168,1	59	14,5	33,5	340	260	3700	820	4,5	2,3	60
13	250	Δ/Y-11	6600	440	1200	46	10,65	181	16	4,5	2,5	1,1	55	15	155,1	168,1	60	14,5	34	340	260	3700	850	4,5	2,3	60
14	250	Y/Δ-11	6000	690	630	126	17,8	64,4	16	4	2,5	1,2	54	15	155,1	168,1	59,0	14,5	34	340	260	3700	820	4,5	2,3	—

Таблица 2.3.- Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
15	250	Y/Y-0	10000	400	1050	42	11.1	198	16	4,55	2,45	0,95	55	15	155,1	168,1	59	14,5	33	340	260	3700	820	4,5	2,3	60
16	630	$\Delta / Y - 11$	6000	400	624	24	29,2	469	21	5,2	3,15	0,9	59,3	20	271,6	282,6	66	19,5	40,5	790	480	7000	1420	5	1,5	70
17	1000	$\Delta / Y - 11$	6000	400	441	17	40,7	754,8	25	4,45	1,95	3,05	68	24	371	372,5	78	23	48	1500	900	10000	2400	5,5	1,4	70
18	1600	Y/Y-0	10000	400	376	15	63,1	1403	29,4	4,35	3,6	1,1	97	26	435	440,7	107,0	25	52	2400	1120	14500	3100	5	1,3	70
19	25	Y/Y-0	3300	230	1032	72	2,78	22,3	9,8	1,8	2,2	1,45	28	9,0	56,1	57,7	34	8,5	21,3	95	60	490	120	4,5	3	40
20	25	Y/Y-0	11000	230	3441	72	0,785	32,4	9,8	2,7	1,25	1,35	28,05	9,0	56,1	57,7	34	8,5	21,3	95	60	490	120	4,5	3	40
21	40	Y/Y-0	3000	230	938	72	4,01	54,2	9,8	2,7	1,55	1,05	43	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8	40
22	40	Y/Y-0	6000	400	1877	125	2,06	27,8	9,8	2,75	1,65	0,95	43,1	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8	40
23	40	Y/Y-0	10000	400	3128	125	1,23	27,8	9,8	2,7	1,65	0,95	43,1	9,0	56,1	57,7	49,5	8,5	21,3	110	75	850	145	4,5	2,8	40
24	160	Y/Y-0	11000	440	1450	58	4,68	120	14,9	3,7	2,7	0,9	45,6	14	135,2	137,6	52	13,5	30,7	225	175	2100	460	4,5	1,7	50
25	250	Y/Y-0	11000	440	1100	44	7,3	154,8	17	3,65	2,6	1,2	49,5	16	166	172	55,5	15,5	33	315	225	3000	650	4,5	2,3	60
26	250	Y/ $\Delta$ - 11	11000	190	1100	33	7,3	210	17	3,65	2,6	1,2	49,6	16	166	172	55,5	15,5	33	315	225	3000	650	4,5	2,3	—
27	400	Y/ $\Delta$ - 11	11000	190	869	26	11	309,6	19	3,6	2,75	1,3	55,2	18	222,6	230,6	62	17,5	36	465	300	4100	900	5	1,5	—
28	400	Y/Y-0	11000	440	875	35	11	242	19	3,6	2,75	1,3	55,6	18	222,6	230,6	62	17,5	36	465	300	4100	900	5	1,5	60
29	630	$\Delta/\Delta - 0$	11000	190	1158	20	11,1	564	21	4,45	3,4	1,4	58	20	271,6	282,6	66	19,5	40,5	800	480	5000	1400	5,5	1,6	—
30	630	$\Delta / Y - 11$	11000	440	1170	27	11,1	417,6	21	4,45	3,4	1,4	58	20	271,6	282,6	66	19,5	40,5	840	480	5100	1400	5,5	1,6	70
31	630	Y/Y-0	6600	420	409	26	34,8	412,8	21	4,4	3,4	1,4	60	20	271,6	282,6	66	19,5	40,5	840	480	5100	1400	5,5	1,6	70
32	1600	$\Delta / Y - 11$	11000	440	779	18	25,8	1120	27	4,55	3,6	1,9	97	26	463,5	469,5	107,0	25	52	2400	1120	12500	2400	5,5	1,3	70
33	10	Y/Y-0	380	230	142	86	6,29	13,9	10,5	1,1	2,15	1,35	17,1	9,5	55,0	64,5	22,0	9,0	22,0	—	—	300	75	4,8	5,0	50
34	16	Y/Y-0	380	230	129	78	10,6	19,4	10,5	1,2	2,2	1,0	26,9	9,5	53,5	62,4	32,0	9,0	22,0	—	—	480	110	4,1	5,0	50
35	25	Y/Y-0	380	230	99	60	20,5	35,2	13,0	1,5	2,45	1,0	27,6	11,0	73,2	87,6	32,0	10,5	27,0	—	—	620	150	4,0	5,0	60
36	40	Y/Y-0	380	230	73	44	32,4	58,3	14,0	1,6	2,3	1,0	29,0	12,0	91,5	111,5	34,0	11,5	28,0	—	—	740	230	3,2	6,0	60

Таблица 2.3- Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
37	63	Y/Y-0	380	230	66	40	30,1	112,5	15,0	1,85	2,85	1,0	41,5	13,0	109,5	120,5	48,0	12,5	31,0	—	—	1300	300	3,7	4,0	70
38	100	Y/Y-0	380	230	43	26	51,4	162,0	20,5	2,4	3,35	1,5	40,5	17,5	167,0	184,0	48,0	16,5	39,0	—	—	1860	530	4,1	4,0	70
39	160	Y/Y-0	380	230	33	20	94,0	244,2	22,5	2,5	3,25	2,5	51,0	19,5	212,0	241,5	60,0	18,5	41,0	—	—	2400	800	4,3	4,0	75
40	10	Y/Y-0	380	230	142	86	10,3	18,9	10,5	1,7	2,4	1,0	16,9	9,5	55,0	64,5	22,0	9,0	22,0	—	—	335	75	4,8	4,5	50
41	16	Y/Y-0	380	230	129	78	16,3	32,4	10,5	1,6	2,6	1,0	26,8	9,5	55,0	64,5	32,0	9,0	22,0	—	—	530	110	4,6	5,0	50
42	25	Y/Y-0	380	230	99	60	32,3	59,8	13,0	2,0	3,05	1,0	27,5	11,0	73,2	87,6	32,0	10,5	27,0	—	—	670	150	5,1	4,5	60
43	40	Y/Y-0	380	230	73	44	47,2	103,5	14,0	2,0	3,4	1,0	29,0	12,0	91,5	111,5	34,0	11,5	28,0	—	—	750	230	4,1	6,0	60
44	100	Y/Y-0	380	230	43	26	86,2	271,6	20,5	2,85	4,25	1,5	40,5	17,5	167,0	184,0	48,0	16,5	39,0	—	—	1960	530	4,8	4,0	70
45	160	Y/Y-0	380	230	33	20	135,8	440,4	22,5	2,9	4,25	1,5	51,0	19,5	212,0	241,5	60,0	18,5	41,0	—	—	2640	800	4,0	5,0	75
46	160	$\Delta/Y-11$	10000	230	1807	24	3,46	348,8	19,0	2,7	3,1	3,6	57,5	16,0	172,0	175,0	78,0	15,0	42,0	—	—	2600	830	5,5	4,0	—
47	250	$\Delta/Y-11$	10000	230	1430	19	5,85	585,0	21,0	2,7	3,3	3,9	73,5	18,0	221,0	223,0	89,0	17,0	45,0	—	—	3500	1050	5,5	3,5	—
48	400	$\Delta/Y-11$	10000	400	1212	28	9,39	553,2	24,0	2,5	3,85	3,9	96,5	21,0	264,0	266,0	112,0	20,0	49,0	—	—	3300	1600	5,5	3,0	—
49	630	$\Delta/Y-11$	10000	400	909	21	15,0	935,0	31,0	2,6	4,1	3,9	104,5	24,0	351,0	360,0	121,0	23,0	56,0	—	—	7200	2300	5,5	2,9	—
50	1600	$\Delta/Y-11$	10000	400	563	13	32,3	2690,0	38,0	3,3	5,4	3,6	148,0	31,0	563,0	574,0	164,0	30,0	152,0	—	—	5000	5,5	2,5	—	—

**Примечания:** 1.  $f=50$  Гц.

2. Трансформаторы № 1—18 с алюминиевыми обмотками; трансформаторы № 19—32 с медными обмотками.

3. Обмотки ВН имеют пять ступеней напряжения: 95; 97,5; 100; 102,5; 105% от  $U_{ном}$ . Напряжения и числа витков обмотки ВН даны для средней ступени.

4. Магнитные системы собраны впереплет, с косыми стыками над крайними стержнями и прямым над средним стержнем, из холоднокатаной стали марки 3404 — 0,35 мм по ГОСТ 21427-83

5. Напряжение нулевой последовательности в процентах от номинального фазного отнесено к току нулевой последовательности, равному номинальному току.

6. Обмотки НН трансформаторов № 1—5, 7—10, 11—13, 15—25, 28, 30—32 соединены по схеме звезда с нулевым выводом.

сеть на обмотке ВН на верхнюю ступень, т.е. на ответвление, соответствующее 105% от номинального напряжения, а второй трансформатор включен на среднюю ступень, т. е. на номинальное напряжение. Определить максимально допустимую мощность установки.

10. Определить наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания (ударный ток) и кратность этого тока по отношению к номинальному току при трехфазном коротком замыкании;

11. а) Найти токи в фазах первичной обмотки и смещение нулевой точки при токах  $I_a = I_{ном}$ ,  $I_B = I_C = 0$  (этот пункт выполняется для трансформаторов № 1-5, 7, 8, 11, 12, 15, 18-25, 28, 31, 33-45 из табл. 2.3.

б) При симметричной системе первичных напряжений трансформатор нагружен только между зажимами  $a$  и  $b$  током  $I_{ном}$ , сдвинутым относительно напряжения  $U_{ab}$  на угол  $\varphi_o = 30^\circ$ . Найти токи в первичной обмотке (без учета намагничивающего тока).

Построить треугольник вторичных приведенных напряжений и определить его сдвиг относительно первичного треугольника. Этот пункт выполняется для трансформаторов № 6, 9, 10, 13, 14, 16, 17, 26, 27, 29, 30, 32, 46-50 из табл. 2.3.

Таблица 2.4

**Основные данные силовых трехфазных  
автотрансформаторов для высоковольтных сетей**

№	Проходная мощность, кВА	Напряжение обмоток, кВ		$u_k$ ВН-НН, %	Потери КЗ $P_k$ , кВт	Потери ХХ $P_x$ , кВт
		ВН	НН			
1	63000	230	121	11,0	200	37
2	125000	230	21	11,0	315	65
3	200000	230	121	11,0	430	105
4	250000	230	121	11,0	500	120
5	125000	330	115	10,0	345	100
6	200000	330	115	10,5	560	155
7	250000	330	158	10,5	620	160
8	400000	330	158	10,0	720	180
9	250000	500	121	13,0	690	200
10	500000	500	230	12,0	1050	220

**Примечания:** 1. Потери и напряжения короткого замыкания отнесены к проходной мощности.

2. Напряжения короткого замыкания отнесены к большему из напряжений сети.

### 3.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТНОМУ ЗАДАНИЮ ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ И АВТОТРАНСФОРМАТОРАМ

Перед выполнением расчетного задания рекомендуется просмотреть соответствующие разделы конспекта лекций и ознакомиться с литературой, указанной в методических указаниях. Во время выполнения задания при использовании

справочных таблиц следует внимательно прочитать заголовки и все примечания к таблицам.

*К пункту 1.* При определении линейных и фазных значений напряжений и токов обмоток ВН и НН следует учесть схемы соединения обмоток, приведенные в табл. 2.3. В числителе указана схема соединения обмотки ВН, в знаменателе – обмотки НН. Все трансформаторы, данные которых приведены в табл. 1 и 2, - трехфазные.

*К пункту 2.* Эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток следует выполнить в масштабе в таком виде, как это показано на рис. 3.1 с простановкой вместо буквенных обозначений заданных размеров трансформатора. Масштаб рекомендуется выбирать таким, чтобы горизонтальный размер рисунка составлял 150-200 мм при размере листа бумаги формата А4.

Отдельно следует показать схемы соединения обмоток ВН и НН, обеспечивающие получение заданной группы соединения обмоток трансформатора, а также топографическую диаграмму, подтверждающую соответствие полученной группы заданию [1], § 2.4; [2], § 2.8; [3] § 1.5.

*К пункту 3. а)* Вначале следует рассчитать массу стали в трех стержнях и двух ярах трехфазной магнитной системы, используя ее размеры из табл. 2.3 и принимая плотность холоднокатаной стали  $\gamma_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$ .

Определить расчетную магнитную индукцию в стержнях  $B_c$  и в ярах  $B_y$  отдельно, принимая ЭДС первичной обмотки, равной номинальному первичному напряжению (ВН).



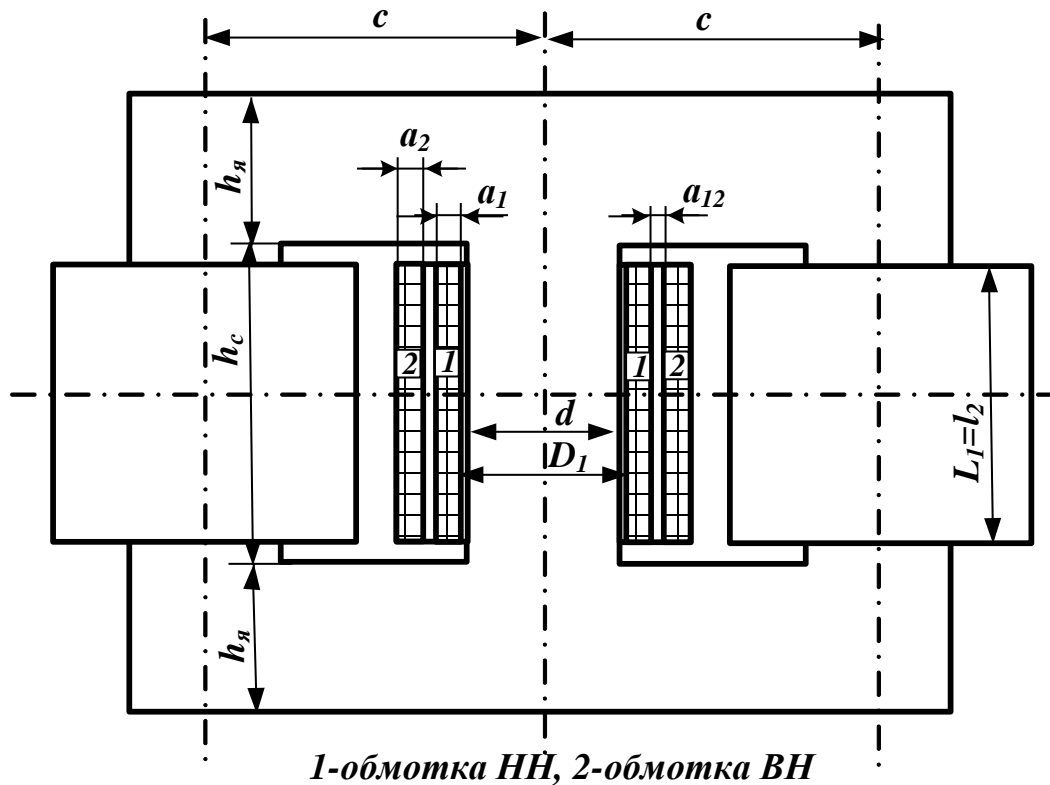


Рис. 3.1. Трёхфазный трансформатор

В практике принято рассчитывать потери холостого хода трансформатора, определяя их как произведение удельных потерь в единице массы, Вт/кг, зависящих от расчетной частоты и индукции и качества стали, на массу стали соответствующей части магнитной системы. Потери рассчитываются отдельно для стержней и ярм и затем суммируются.

Добавочные потери, возникающие в магнитных системах из холоднокатаной текстурованной анизотропной стали вследствие несовпадения направления вектора магнитной индукции с направлением прокатки стали, неравномерного распределения индукции в стержнях и ярмах, а также вызванные механическими воздействиями в процессе заготовки пластин стали и сборки остова трансформатора, могут быть учтены постоянным коэффициентом  $K_{\Pi}$

Потери холостого хода

$$P_x = K_{\Pi} \cdot (p_c \cdot G_c + p_{\text{я}} \cdot G_{\text{я}}),$$

где  $p_c$  и  $p_y$  – удельные потери в стали стержней и ярм, определенные по табл. 3.1 для соответствующих индукций в стержне  $B_c$  и в ярме  $B_y$ , Вт/кг;  $G_c$  и  $G_y$ , – массы стали стержней и ярм, кг.

Таблица 3.1

**Удельные потери  $p$ , Вт/кг, и удельная намагничивающая мощность  $q$ , В·А/кг, при частоте 50 Гц для холоднокатаной электротехнической стали марок 3404 и 3405 толщиной 0,35 мм**

В, Тл	Удельные потери $p$ , Вт/кг		Намагничивающая мощность $q$ , В·А/кг	
	3404 (0,35 мм)	3405 (0,35 мм)	3404 (0,35 мм)	3405 (0,35 мм)
1,00	0,475	0,45	0,548	0,533
1,20	0,675	0,635	0,752	0,732
1,30	0,785	0,755	0,9	0,86
1,40	0,930	0,875	1,06	1,02
1,50	1,10	1,030	1,33	1,246
1,52	1,134	1,07	1,408	1,311
1,54	1,168	1,11	1,486	1,376
1,56	1,207	1,15	1,575	1,447
1,58	1,251	1,19	1,675	1,524
1,60	1,295	1,23	1,775	1,602
1,62	1,353	1,278	1,956	1,748
1,64	1,411	1,326	2,131	1,894
1,66	1,472	1,38	2,556	2,123
1,68	1,536	1,44	3,028	2,435
1,70	1,60	1,50	3,4	2,747

1,72	1,672	1,56	4,48	3,547
1,74	1,744	1,62	5,56	4,347

Для плоской шихтованной магнитной системы трансформаторов мощностью 1000 кВ·А и более с многоступенчатым сечением стержня и ярма, с косыми стыками в четырех углах и прямыми стыками в двух углах, собранной из отожженных пластин холоднокатаной стали марок 3404 и 3405 с толщиной пластин 0,30 и 0,35, мм (рис. 3.2, а) коэффициент  $K_{\Pi} = 1,40$ .

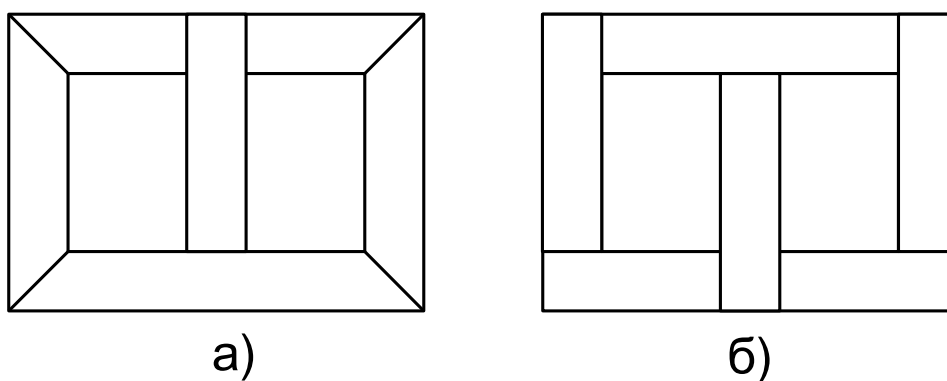


Рис.3.2. Схема магнитопровода трансформатора:

а) из холоднокатаной стали с косыми стыками

б) из горячекатаной стали с прямыми стыками

Для трансформаторов мощностью 63-630 кВ·А при прямых стыках в шести углах магнитной системы (рис. 3.2, б)  $K_{\Pi} = 1,8$ .

Для расчета тока холостого хода рассчитывается общая намагничивающая мощность магнитной системы

$$Q_x = K_T \cdot (q_c \cdot G_c + q_y \cdot G_y)$$

где  $q_c$  и  $q_y$  – удельные намагничивающие мощности для стали стержней и ярм по табл. 3.1 для соответствующих значений индукции  $B_c$  и  $B_y$ , В·А/кг. Коэффициент  $K_T$  учитывает увеличение намагничивающей мощности, вызванное воздействием ранее упомянутых конструктивных, технологических и других факторов. Для плоской шихтованной магнитной системы вышеназванных конструкций этот

коэффициент может быть принят: при мощностях 63–630 кВ·А  $K_T = 11–110$ ; 1000–6300 кВ·А  $K_T = 5$ ; 10 000 и выше  $K_T = 4,5$ .

Ток холостого хода:

активная составляющая

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \cdot S}, \%,$$

реактивная составляющая

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{10 \cdot S}, \%,$$

полный ток холостого хода

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2},$$

где  $P_x$  измеряется в [Вт],  $Q_x$  – [В·А];  $S$  – [кВ·А].

Ток холостого хода может быть также определен для каждого стержня (каждой фазы обмоток) отдельно. При этом током холостого хода трансформатора считают среднее арифметическое трех этих токов

$$I_0 = \frac{i_{0A} + i_{0B} + i_{0C}}{3}.$$

Реальный ток холостого хода

$$I_{0A} = \frac{i_{0A} \cdot I_{ном}}{100}; I_{0p} = \frac{i_{0p} \cdot I_{ном}}{100}; I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{ном}}{100},$$

где  $I_{ном}$  – номинальный ток первичной обмотки (высшего напряжения),

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_x}{I_0 \cdot U_{ном} \cdot \sqrt{3}}; \sin \varphi_0 = \frac{Q_x}{I_0 \cdot U_{ном} \cdot \sqrt{3}}.$$

После определения потерь и тока холостого хода трансформатора следует полученные данные сравнить с контрольными. Результаты расчета не должны сильно отличаться от контрольных данных.

Согласно ГОСТ отклонение потерь и тока холостого хода трансформатора от нормированного значения не должны быть больше +15% и +30% соответственно.

[1], §2.1, 2.2; [3], §1.2; [4], § 8.2 и 8.3.

б) Параметры схемы замещения трансформатора рассчитываются по параметрам первичной обмотки (обмотки ВН) и получаются приведенными к этой обмотке

$$z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}}; r_0 = z_0 \cdot \cos \varphi_0; x_0 = z_0 \cdot \sin \varphi_0.$$

[1], §3.4; [2], §2.6; [3], § 1.4.

в) При выполнении этого пункта следует произвести расчет значений величин по методу указанному для п. 3, а для напряжений  $U = (0,5; 0,7; 0,9; 1,00 \text{ и } 1,10)$  от  $U_{ном}$ .

г) Рассчитываются потери холостого хода при номинальном напряжении первичной обмотки (обмотки ВН) с учетом изменения индукции при изменении частоты. При этом

$$P_x = p_{x50} \cdot \left( \frac{B}{B_{50}} \right)^2 \cdot \left( \frac{f}{f_{50}} \right)^{1.3},$$

где  $p_{x50}$ ,  $B_{50}$ ,  $f_{50}$  – данные при частоте 50 Гц.

К пункту 4. а) Вначале следует рассчитать массу металла обмотки ВН и обмотки НН, используя размеры обмоток и их числа витков, приведенные в табл. 1 или 2, и эскиз магнитной системы и размещения на ней обмоток, выполненный по п. 2. Плотность металла обмоток меди  $\gamma_m = 8900 \text{ кг/м}^3$ , алюминия  $\gamma_a = 2700 \text{ кг/м}^3$ . Потери

короткого замыкания рассчитываются для каждой обмотки и затем суммируются

$$P_{осн} = P_{осн1} + P_{осн2}$$

Потери короткого замыкания трансформатора  $P_k$  определяются для обмоток, имеющих номинальную эксплуатационную температуру +75 °С. При определении  $P_k$  следует учесть, что помимо основных (электрических) потерь в обмотках возникают добавочные потери. К потерям короткого замыкания относятся также потери в отводах (проводах) от обмоток к проходным изоляторам и переключающим устройствам, потери в стальных деталях крепления магнитной системы и в стенках бака; вызванные полем рассеяния обмоток; и отводов. Все эти добавочные потери могут быть ориентировочно оценены средним коэффициентом по отношению к основным потерям, т.е.

$$P_k = P_{осн} \cdot k$$

где  $k$  может быть принят для трехфазных трансформаторов мощностью до 100 кВ·А – 1,03; 160–630 кВ·А – 1,06; 1000–6300 кВ·А – 1,12.

Основные потери при +75°С:

- в медных обмотках

$$P_{осн.м} = 2,4 \cdot J^2 G_0 ;$$

- в алюминиевых обмотках

$$P_{осн.а} = 12,75 \cdot J^2 G_0 ,$$

где  $J$  – плотность тока в обмотке, А/мм<sup>2</sup>;  $G_0$  – масса металла обмотки, кг.

При выводе выражения  $P_{осн}$  приняты указанные выше плотности металла обмоток и удельные электрические сопротивления

при  $+75^{\circ}\text{C}$ : меди  $\rho_m = 0,02135$  мкОм·м и алюминия  $\rho_a = 0,0344$  мкОм·м.

б) Для определения напряжения короткого замыкания следует найти активную  $r_{\kappa}$  и реактивную  $x_{\kappa}$  составляющие сопротивления короткого замыкания трансформатора  $z_{\kappa}$ . Потери короткого замыкания в трех фазах обмоток

$$P_{\kappa} = 3 \cdot I_{\text{ном.}\phi}^2 \cdot r_{\kappa},$$

где  $r_{\kappa}$  – активное сопротивление одной фазы обмоток; Ом;

$I_{\text{ном.}\phi}$  – номинальное значение фазного тока;

$$r_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3 \cdot I_{\text{ном.}\phi}^2}.$$

Активная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение:

$$U_{a.\phi} = I_{\text{ном.}\phi} \cdot r_{\kappa}, [\text{В}] \text{ или } u_a = \left( \frac{U_{a.\phi}}{U_{\text{ном.}\phi}} \right) \cdot 100, [\%]$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, фазное значение

$$U_{p.\phi} = I_{\text{ном.}\phi} \cdot x_{\kappa}, [\text{В}] \text{ или } u_p = \left( \frac{U_{p.\phi}}{U_{\text{ном.}\phi}} \right) \cdot 100, [\%]$$

где  $x_{\kappa}$  – реактивное сопротивление одной фазы обмоток, Ом;

$$z_{\kappa} = \sqrt{r_{\kappa}^2 + x_{\kappa}^2}; \cos \varphi_{\kappa} = \frac{r_{\kappa}}{z_{\kappa}}.$$

При расчете  $z_{\kappa}$ ,  $u_{\kappa}$  и их составляющих пользоваться фазными значениями номинального напряжения и тока первичной обмотки (обмотки ВН).

[1], §3.5 и §3.6; [2], §2.6; [3], §1.4; [4], §7.1 и §7.2.

в) [1], §4.2; [2], §2.10; [3], §1.6.

*К пункту 5.* Привести все параметры трансформатора к первичной обмотке (обмотке ВН). При построении диаграммы условно считать, что  $x_1 = x_2' = \frac{x_\kappa}{2}$  и  $r_1 = r_2' = \frac{r_\kappa}{2}$ . Принять  $U_2' = U_{1ном}$ .

[1], §3.3; [2], §2.3; [3], § 1.3.

*К пункту 6. а)* При расчёте КПД для различных значений  $I_2$  следует учесть, что вместе с изменением нагрузки трансформатора при неизменном напряжении сети квадратично изменяются основные и добавочные потери в обмотках, а также потери, вызванные полем рассеяния обмоток и отводов в баке и крепежных конструкциях магнитной системы, и потери в отводах. Потери в стали магнитной системы остаются практически неизменными.

б) Среднесуточный КПД равен отношению энергии, отданной трансформатором во вторичную сеть в течение суток, к энергии, полученной трансформатором за тот же период из; первичной сети. Суточный КПД может быть найден по формуле

$$\eta_c = 1 - \frac{(\beta_1^2 \cdot t_1 + \beta_2^2 \cdot t_2 + \dots + \beta_n^2 \cdot t_n) \cdot P_\kappa + 24 \cdot P_x}{\cos \varphi_2 \cdot (\beta_1 \cdot t_1 + \beta_2 \cdot t_2 + \dots + \beta_n \cdot t_n) \cdot S_{ном} + (\beta_1^2 \cdot t_1 + \beta_2^2 \cdot t_2 + \dots + \beta_n^2 \cdot t_n) \cdot P_\kappa + 24 \cdot P_x}$$

где  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  – отношение тока нагрузки к номинальному току для отрезков времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  выраженных в часах;  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;  $P_\kappa$  и  $P_x$  – потери короткого замыкания и холостого хода трансформатора, кВт. [1], §4.3; [2], §2.10; [3], §1.6.

*К пункту 7.* В табл. 2.2 потери и напряжение короткого замыкания даны для номинальной мощности обмотки ВН– $S_{ном}$ . При расчете параметров схемы замещения и других данных трансформатора их приводят к числу витков обмотки ВН. Расчет



сопротивлений короткого замыкания  $r_k$ ,  $x_k$  и  $z_k$  для пар обмоток ВН–СН; ВН–НН и СН–НН производят как для двухобмоточного трансформатора через заданные потери и напряжение короткого замыкания

$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_{ном.ф}^2}; \quad z_k = \frac{u_k \cdot U_{ном.ф}}{100 \cdot I_{ном.ф}}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Параметры схемы замещения  $x_1, x_2, x_3, r_1, r_2, r_3, z_1, z_2, z_3$  определяются на основании полученных  $r_k, x_k$  и  $z_k$ .

При построении векторной диаграммы трансформатора рекомендуется принять угол между токами  $I_2$  и  $I_3$  равным  $\alpha = \varphi_3 - \varphi_2$ . Диаграмму рекомендуется построить по рис. 8.4 [1]; или рис. 1.37 [3].

[1], §8.1; [2], §2.12; [3], §1.8.

К пункту 8. В табл. 2.4 приведены данные двухобмоточных трехфазных автотрансформаторов. Потери и напряжения короткого замыкания отнесены к большему из линейных напряжений. Схему соединения обмоток см. на рис. 3.3.

[1], §8.2; [2], §2.13; [3], §1.7; [4], §3.2.

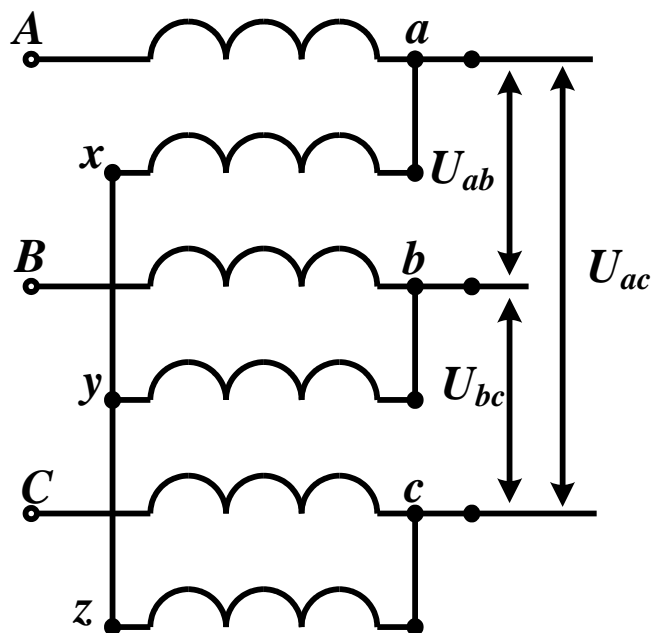


Рис. 3.3. Схема соединения обмоток автотрансформатора

К пункту 9. [1], §6.1, 6.2 и 6.4; [2], §2.11; [3], §1.9;

К пункту 10. Ударный ток короткого замыкания – наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания определяется по амплитудному значению тока короткого замыкания в соответствии с формулой

$$i_{км} = k_m \cdot \sqrt{2} \cdot I_{к.уст} ,$$

где  $I_{к.уст} = I_{ном} \cdot 100 / u_k$ ;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий

апериодическую составляющую тока, который может быть принят  $k_m = 1,55$  для трансформаторов мощностью до 630 кВ·А и  $k_m = 1,70$  для трансформаторов мощностью 1000-6300 кВ·А;  $I_{к.уст}$  – установившийся ток короткого замыкания.

[1], §9.2; [2], §2.6; [3], §5.8; [4], §7.3

К пункту 11. Для решения задачи распределения токов при несимметричной нагрузке пользуются методом симметричных составляющих. Для определения сопротивлений нулевой последовательности  $z_{00}$  нужно использовать напряжение нулевой последовательности  $U_0$ , приведенное в табл. 1 или 2, которое дается в процентах от номинального напряжения при токе нулевой последовательности, равном номинальному току:

$$U_0 = \left( \frac{I_{ном.ф} \cdot z_{00}}{U_{ном}} \right) \cdot 100, [\text{Ом}]$$

Следует отметить, что в трансформаторах с магнитосвязанной трехфазной магнитной системой сопротивление нулевой последовательности  $z_{00}$  значительно меньше сопротивления холостого хода  $z_0$ .

[1], §7.1-7.4; [2], § 2.16; [3], § 1.10.

### **3.УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНОГО ЗАДАНИЯ**

1. Расчетное задание оформляется на листах писчей бумаги. Формат А4 –297×210 мм.

2. Текст пишется чернилами или шариковой ручкой. В тексте необходимо приводить все использованные формулы. Полученные значения величин должны снабжаться соответствующими размерностями. При использовании табличного и справочного материала дать в тексте краткие пояснения.

3. Эскизы и графики оформляются на миллиметровой бумаге формата А4 в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД). Кривые обводить по лекалу.

4. Расчетное задание брошюруется и снабжается титульным листом с указанием:

- а) названия расчетного задания;
- б) номера варианта и обозначения типа трансформатора;
- в) факультета и группы, фамилии и инициалов студента.

#### 4.КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните назначение и принцип действия трансформатора?
2. Для чего проводится опыт холостого хода трансформатора?
3. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора?
4. Перечислите виды потерь энергии в трансформаторе?
5. Что такое группы соединений обмоток трансформатора?
6. В чём отличия автотрансформатора и трансформатора?
7. Что такое коэффициент трансформации? Чем отличается фазный коэффициент трансформации от линейного?
8. Как определить фазный и линейный коэффициенты трансформации расчетным путем?
9. Как определить коэффициент трансформации экспериментальным путем?
10. Можно ли определять коэффициент трансформации при напряжении, отличающемся от номинального?
11. В чем заключается опыт холостого хода трансформатора? По какой схеме он проводится?
12. Что называется током холостого хода и потерями холостого хода трансформатора? В каких единицах они выражаются?
13. В каких частях трансформатора возникают потери при холостом ходе? Какие из них составляют большую часть потерь холостого хода?
14. При опыте холостого хода первичной является обмотка НН. Можно ли в качестве первичной использовать обмотку ВН?
15. Что называется током холостого хода трансформатора?
16. Какой вид имеет схема замещения для холостого хода трансформатора? Как определить параметры схемы замещения по данным опыта холостого хода?
17. В чем заключается опыт короткого замыкания трансформатора? По какой схеме он проводится?
18. Что называется напряжением короткого замыкания и потерями короткого замыкания трансформатора? В каких единицах они выражаются?
19. В каких частях трансформатора возникают потери при опыте короткого замыкания? Какие из них составляют большую часть потерь короткого замыкания?
20. Какой вид имеет схема замещения при коротком замыкании трансформатора? Как определить параметры схемы замещения по данным опыта короткого замыкания?
21. Что называется изменением напряжения двухобмоточного трансформатора? В каких единицах оно выражается?

22. Как устроен трехфазный трансформатор? Объясните устройство магнитопровода.
23. Как устроены однофазные трансформаторы стержневого и броневые типов?
24. Какие материалы используются для изготовления магнитопроводов трансформаторов?
25. Какие потери энергии измеряются в опытах холостого хода и короткого замыкания?
26. От каких факторов зависят потери в стали и в меди трансформатора, работающего на нагрузку. Как эти потери изменяются при изменении нагрузки?
27. Какие две составляющие имеет ток холостого хода? Чем они обусловлены?
28. С какой целью выполняется определение группы соединения обмоток трехфазного трансформатора?
29. От чего зависит принадлежность трансформатора к той или иной группе?
30. Что означает число в обозначении группы соединения?
31. Какими способами определяются группы соединения?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Токарев Б. Ф. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990, 624 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: ЮРАЙТ, 2012, 627с.
3. Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимов Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. М.: Высшая школа, 1989, 352 с.
4. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. М.: ЛЕНАНД, 2014, 528 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.....	4
2.РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ И АВТОТРАНСФОРМАТОРАМ.....	14
3.МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТНОМУ ЗАДАНИЮ ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ И АВТОТРАНСФОРМАТОРАМ.....	24
4.КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	39

Учебное издание

**Баль** Владимир Борисович  
**Копылов** Сергей Игоревич  
**Панихин** Михаил Викторович

## РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Учебное пособие

по курсу

*«Электрические машины»*

*«Проектирование электрических машин»*

для студентов, обучающихся по направлению

*«Электроэнергетика и электротехника»*

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 2014 (II), метод.	Подписано в печать
Формат 60x84/16 Физ.печ.л. 2,5 Изд.№	Заказ Тираж 200 экз

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ,

111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14

Отпечатано в ПЦ МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.13

© Национальный исследовательский  
 Университет МЭИ, 2015

**ISBN**