

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

## **ТРАНСФОРМАТОРЫ**

### ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам по электротехнике для студентов специальностей  
1-50 01 01, 1-50 01 02, 1-50 02 01, 1-54 01 01, 1-36 08 01, 1-36 01 01,  
1-36 01 03, 1-36 01 04, 1-53 01 01-05**

ВИТЕБСК  
2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**СОГЛАСОВАНО**

**Зам. председателя  
редакционно-издательского совета  
ВГТУ**

\_\_\_\_\_ **В.В. Пятов**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2010 г.**

**УТВЕРЖДАЮ**

**Первый проректор**

\_\_\_\_\_ **С.И. Малашенков**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ **2010 г.**

## **ТРАНСФОРМАТОРЫ**

### ***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам по электротехнике для студентов специальностей  
1-50 01 01, 1-50 01 02, 1-50 02 01, 1-54 01 01, 1-36 08 01, 1-36 01 01,  
1-36 01 03, 1-36 01 04, 1-53 01 01-05.**

ВИТЕБСК  
2010

УДК 621.3(07)

Трансформаторы: методические указания к лабораторным работам по электротехнике для студентов специальностей 1-50 01 01, 1-50 01 02, 1-50 02 01, 1-54 01 01, 1-36 08 01, 1-36 01 01, 1-36 01 03, 1-36 01 04, 1-53 01 01-05

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО "ВГТУ", 2010.

Составители: доц. Ильющенко А.В.,  
ст. преп. Куксевич В.Ф.

Методические указания содержат теоретический материал, необходимый для анализа и расчёта основных электрических параметров, построения характеристик однофазных и трехфазных трансформаторов, а также лабораторные работы по указанным темам и перечень используемой литературы.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями, предъявляемыми к выполнению лабораторных работ.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО "ВГТУ" 14.10.2010 г., протокол № 4

Рецензент: доц. Новиков Ю.В.  
Редактор: доц. Попов Ю.В.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО "ВГТУ" \_\_\_\_\_ г., протокол № \_\_\_\_

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования "Витебский государственный технологический университет"

Подписано к печати\_\_\_\_\_. Формат\_\_\_\_\_. Уч.-изд. лист.\_\_\_\_\_  
Печать ризографическая. Тираж\_\_\_\_\_ экз. Заказ №\_\_\_\_\_. Цена\_\_\_\_\_ руб.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

# Содержание

Теоретическая часть.....	4
1 Однофазные трансформаторы .....	4
1.1 Холостой ход трансформатора .....	4
1.2 Уравнение намагничивающих сил .....	7
1.3 Нагруженный трансформатор.....	8
1.4 Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора.....	9
1.5 Схема замещения трансформатора. ....	11
1.6 Изменение вторичного напряжения и внешние характеристики трансформатора .....	14
1.7 Коэффициент полезного действия трансформатора. ....	16
2 Трехфазные трансформаторы .....	17
2.1 Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора.....	18
Порядок выполнения лабораторных работ.....	21
Требования к оформлению отчета.....	21
Лабораторная работа № 1	
<i>Исследование режимов холостого хода и короткого замыкания однофазного трансформатора .....</i>	<i>22</i>
Лабораторная работа № 2	
<i>Исследование рабочего режима однофазного трансформатора .....</i>	<i>24</i>
Лабораторная работа № 3	
<i>Исследование трехфазного трансформатора .....</i>	<i>27</i>
Литература .....	28

# Теоретическая часть

## 1 Однофазные трансформаторы

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования посредством магнитного поля электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения при одной и той же частоте.

Электромагнитная схема однофазного трансформатора представлена на рис. 1.

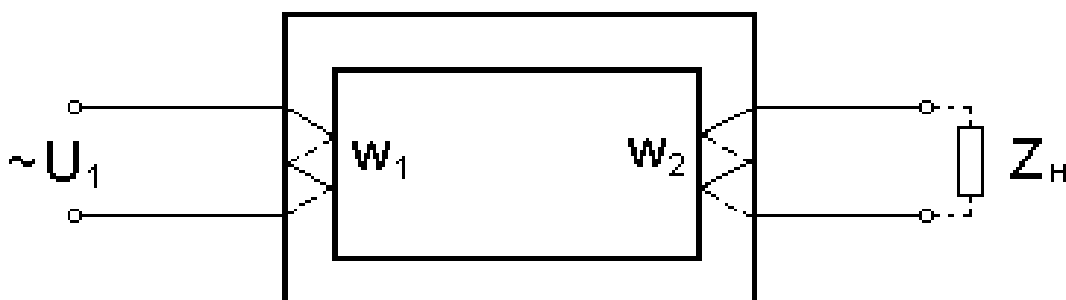


Рисунок 1 – Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Трансформатор состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника, набранного из листов электротехнической стали толщиной  $0,35 \div 0,5$  мм, на котором размещены две обмотки. Обмотка, подключенная к сети переменного тока с напряжением  $U_1$ , называется первичной. Обмотка, к которой подключается нагрузка  $Z_H$ , называется вторичной. Первичная и вторичная обмотки имеют соответственно число витков  $w_1$  и  $w_2$ . Все электрические величины, относящиеся к первичной обмотке, обозначаются индексом 1, ко вторичной – индексом 2.

### 1.1 Холостой ход трансформатора

Пусть первичная обмотка трансформатора подключена к сети переменного синусоидального тока с напряжением  $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$ , вторичная обмотка разомкнута. Под действием напряжения  $u_1$  в первичной обмотке будет протекать ток с действующим значением  $I_0$ , изменяющийся также по синусоидальному закону. Ток  $I_0$  возбуждает в сердечнике пульсирующий магнитный поток, изменяющийся также по синусоидальному закону  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ . Силовые линии потока  $\Phi$  замыкаются в магнитопроводе, и его называют главным, или рабочим магнитным потоком. Поток  $\Phi$  индуцирует в

обмотках эдс  $e_1$  и  $e_2$ . Эдс  $e_1$  уравнивает значительную часть напряжения  $u_1$ . Напряжение на вторичной обмотке  $u_{20}=e_2$ . Его называют напряжением холостого хода. Ток  $I_0$  небольшой и составляет (2-10)% номинального тока первичной обмотки  $I_{ном}$ , его называют током холостого хода.

Кроме главного потока, возникает поток  $\Phi_{1\sigma}$ , силовые линии которого замыкаются по воздуху вокруг первичной обмотки и не пронизывают витки вторичной обмотки. Этот поток называют потоком рассеяния. Так как магнитное сопротивление воздуха значительно больше магнитного сопротивления сердечника, то величина  $\Phi_{1\sigma} \ll \Phi_m$ . Его можно считать пропорциональным току  $I_0$  и совпадающим с ним по фазе.

Главный магнитный поток  $\Phi$  пропорционален приложенному к первичной обмотке напряжению  $U_1$  и отстает от него по фазе на угол  $\frac{\pi}{2}$ . Поток  $\Phi$  в обмотках наводят эдс, мгновенные значения которых

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{и} \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

т.е. их величины определяются скоростью изменения потока  $\Phi$ . Действующие значения эдс обмоток:

$$E_1 = 4,44w_1 f \Phi_m \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44w_2 f \Phi_m,$$

где  $f$  — частота переменного тока сети. Эти эдс отстают от потока  $\Phi_m$  на четверть периода.

Отношение

$$\left| \frac{e_1}{e_2} \right| = \frac{w_1}{w_2} = K$$

называется коэффициентом трансформации. Это соотношение указывает на важнейшее свойство трансформатора преобразовывать напряжения без искажения их формы. Поэтому при синусоидальном напряжении  $u_1$  форма напряжения  $u_2$  будет синусоидальной. Но здесь необходимо заметить, что данное утверждение справедливо только для идеального трансформатора, в котором отсутствуют потери.

Приложенное к первичной обмотке напряжение  $U_1$  уравнивает эдс  $\dot{E}_1$ , индуктируемую главным потоком  $\Phi_m$ , и эдс  $E_{1\sigma}$ , индуктируемую  $\Phi_{1\sigma}$ , а также компенсирует падение напряжения на активном сопротивлении  $r_1$  первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1.$$

Поток рассеяния  $\Phi_{1\sigma}$  пропорционален току  $I_0$ , тогда, вводя понятие индуктивного сопротивления  $X_1$  первичной обмотки, можно заменить  $\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 X_1$ . Тогда выражение (1) будет иметь вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 r_1. \quad (1)$$

Уравнение (1) является уравнением электрического состояния первичной цепи.

На основании уравнения (1) строится векторная диаграмма холостого хода трансформатора (рис. 2).

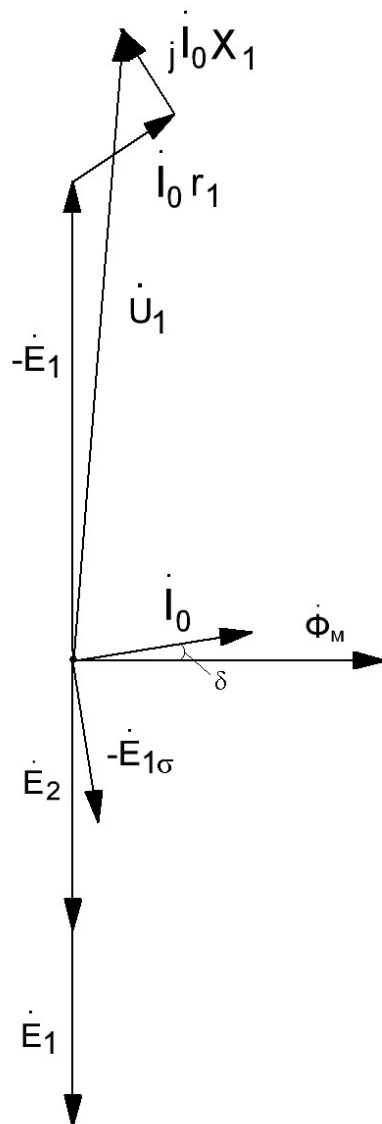


Рисунок 2 – Векторная диаграмма холостого хода трансформатора

## 1.2 Уравнение намагничивающих сил

Изменение магнитного потока  $\Phi_m$  в сердечнике трансформатора однозначно определяется приложенным к первичной обмотке напряжением  $u_1$ :

$$\Phi(t) = \frac{1}{w_1} \int u_1 dt.$$

Это справедливо по той причине, что в реальном трансформаторе составляющие  $j\dot{I}_0 X_1$  и  $\dot{I}_0 r_1$  малы по сравнению с ЭДС  $E_1$ , и с достаточной степенью точности можно утверждать, что

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = 0.$$

В свою очередь,  $\Phi(t)$  определяется величиной напряженности магнитного поля  $H(t)$  в сердечнике, так как эти величины связаны между собой параметрической зависимостью  $B(H)$ , которая графически выражается динамической петлей гистерезиса.

С другой стороны,  $H(t)$  связана по закону полного тока с намагничивающими (магнитодвижущими) силами (МДС) первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$H(t) = \frac{w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2}{l_c}, \quad (2)$$

где  $l_c$  — длина средней магнитной линии сердечника;

$w_1 \dot{I}_1 = \dot{F}_1$ ;  $w_2 \dot{I}_2 = \dot{F}_2$  — магнитодвижущие силы обмоток.

Следовательно, при заданном законе изменения напряжения на первичной обмотке  $u_1$  сумма намагничивающих сил в каждый момент времени должна иметь определенное значение независимо от характера и величины нагрузки трансформатора. В частности, при холостом ходе  $I_2=0$  и магнитный поток создается только током холостого хода  $\dot{I}_0$ . Тогда

$$H(t) = \frac{w_1 \dot{I}_0}{l_c}. \quad (3)$$

Из совместного решения уравнения (2), (3) следует, что

$$w_1 \dot{I}_0 = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2. \quad (4)$$



Уравнение (4) называют уравнением намагничивающих сил (мдс) трансформатора. Преобразуем его:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \frac{1}{K} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}'_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\dot{I}'_2 = \frac{1}{K} \dot{I}_2$ .

Следовательно, ток первичной обмотки  $\dot{I}_1$  имеет две составляющие:  $\dot{I}_0$  и  $\dot{I}'_2$ . Составляющая  $\dot{I}_0$  создает магнитный поток  $\dot{\Phi}$  сердечника, составляющая  $\dot{I}'_2$  компенсирует воздействие на поток сердечника мдс вторичной обмотки. Поэтому поток в сердечнике при любой нагрузке сохраняет свою величину и остается таким же, как и при холостом ходе.

Форма кривой тока  $\dot{I}_2$  в общем случае не соответствует форме кривой тока  $\dot{I}_1$ , так как ток  $\dot{I}_1$  имеет составляющую  $\dot{I}_0$ . Ток  $\dot{I}_0$  является намагничивающим током, временной закон его изменения определяется приложенным напряжением  $u_1$  и формой динамического цикла перемагничивания сердечника. Поэтому чем больше величина  $\dot{I}_0$ , тем больше отличаются по форме токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ .

### 1.3 Нагруженный трансформатор

Пусть ко вторичной обмотке трансформатора подключена нагрузка  $Z = r + jX$ . Тогда во вторичной обмотке будет протекать ток  $\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z}$ . Этот ток создает свой магнитный поток, который оказывает размагничивающее действие на главный магнитный поток. Вследствие этого ток первичной обмотки  $\dot{I}_1$  увеличится. Т.е. изменение тока нагрузки  $\dot{I}_2$  сопровождается автоматическим изменением тока  $\dot{I}_1$ , что следует из уравнения (5).

Кроме того, ток  $\dot{I}_2$  создаёт свой магнитный поток рассеяния  $\Phi_{2\sigma}$ , замыкающийся по воздуху. ЭДС рассеяния  $\dot{E}_{2\sigma} = 4,44w_2 f \Phi_{2\sigma m}$  будем учитывать как падение напряжения на индуктивном сопротивлении  $X_2$  вторичной обмотки:

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 X_2.$$

Кроме того, ток  $\dot{I}_2$  создаёт падение напряжения на активном сопротивлении  $r_2$  вторичной обмотки.

Уравнение электрического состояния цепей трансформатора имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 r_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 r_2\end{aligned}\quad (6)$$

## 1.4 Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора

Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора являются элементом технического контроля каждого трансформатора. На основании этих опытов определяются исходные данные для расчета основных эксплуатационных характеристик трансформатора и параметров его схемы замещения.

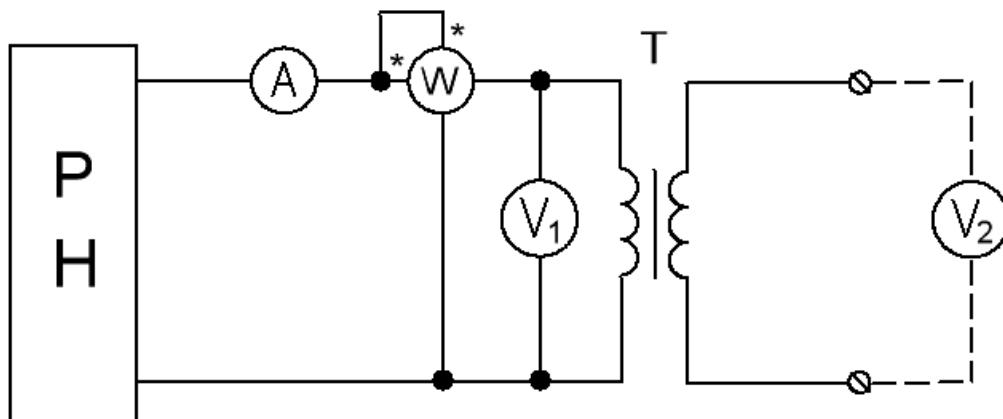


Рисунок 3 – Схема опыта холостого хода трансформатора

### А. Опыт холостого хода

В опыте холостого хода в цепь вторичной обмотки трансформатора включается только вольтметр  $V_2$ , поэтому можно считать, что она разомкнута. С помощью регулятора напряжения **РН** на первичную обмотку подаётся напряжение  $U_1 = U_{I_{ном}}$ . Амперметр **А** показывает ток холостого хода  $I_0$ , ваттметр **W** — потери мощности в самом трансформаторе  $\Delta P_{см}$ . Поскольку ток  $I_0$  мал в сравнении с номинальным током первичной обмотки  $I_{I_{ном}}$ , а ток во вторичной обмотке вообще отсутствует, то омическими потерями можно пренебречь, считая их равными нулю. Вследствие этого можно считать, что ваттметр показывает мощность  $P_0$ , которая определяется магнитными

потерями в трансформаторе, состоящими из потерь на гистерезис (перемагничивание железа трансформатора с частотой сети  $f_c$ ), вихревые токи и создание магнитного потока рассеяния  $\Phi_{1\sigma}$ .

Из полученных экспериментальных данных определяются параметры холостого хода  $Z_0$ ,  $r_0$ ,  $X_0$ :

$$Z_0 = \frac{U_{I_{ном}}}{I_0}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{r_0}{Z_0}.$$

Эти параметры называются параметрами намагничивающей цепи.

Измерив напряжения  $U_{I_{ном}}$  и  $U_{20}$ , определяют коэффициент трансформации  $K = \frac{U_{I_{ном}}}{U_{20}}$ .

По величине тока  $I_0$  и мощности потерь  $P_0$  делают вывод о качестве материала, использованного для сердечника, о правильности выбора сечения сердечника и числа витков первичной обмотки.

## Б. Опыт короткого замыкания

В опыте короткого замыкания вторичная обмотка закорачивается. Напряжение на первичной обмотке регулятором напряжения увеличивается от 0 до некоторого напряжения  $U_k$ , при котором ток первичной обмотки будет равен номинальному  $I_1 = I_{ном}$ . Это напряжение  $U_k$  называется напряжением короткого замыкания. Его обычно выражают в процентах от номинального напряжения первичной обмотки. У повышающих трансформаторов  $U_k$  составляет (5-10)%, у понижающих (35%). Так как величина магнитного потока в сердечнике определяется приложенным к первичной обмотке напряжением, то составляющая намагничивающего тока первичной обмотки значительно меньше токов  $I_{I_{ном}}$  и  $I_{2ном}$ . Поэтому магнитные потери в опыте короткого замыкания незначительны, и ими можно пренебречь.

Ваттметр показывает мощность потерь  $P_k$ , идущих на нагрев обмоток трансформатора, т.к. по ним протекают номинальные токи. Из данных опыта определяют параметры короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{I_{ном}}}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_{I_{ном}}^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}.$$

При расчётах параметров трансформатора используются величины:

$$U_{к.а} = U_{к} \cos \varphi_{к} = \frac{r_{к} I_{н\text{о}м}}{U_{н\text{о}м}} \cdot 100\%;$$

$$U_{к.р} = U_{к} \sin \varphi_{к} = \frac{X_{к} I_{н\text{о}м}}{U_{н\text{о}м}} \cdot 100\%.$$

Короткое замыкание работающего трансформатора является аварийным режимом, т.к. токи в обмотках возрастают во много раз. И особенно опасны межвитковые замыкания между соседними витками.

## 1.5 Схема замещения трансформатора

Между обмотками трансформатора существует магнитная связь, что значительно усложняет расчет электрических цепей, содержащих трансформаторы. Графическое решение с помощью векторных диаграмм не обеспечивает необходимую точность. Поэтому для анализа и расчета трансформаторов используется схема замещения, в которой реальная магнитная связь между обмотками заменена гальванической. При этом возникает единая электрическая цепь переменного тока, что значительно упрощает её расчет.

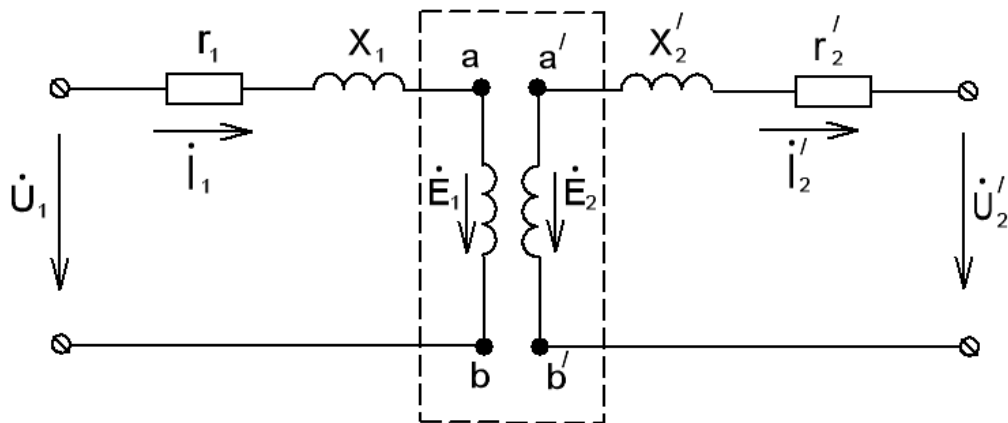


Рисунок 4 – Схема замещения обмоток трансформатора с магнитной связью

В схеме, представленной на рис. 4, активные и реактивные сопротивления обмоток  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  вынесены. Пунктирная линия, охватывающая обмотки, отражает только магнитную связь, в них действует ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ . Однако для образования гальванической связи объединить точки  $a$  с  $a'$  и  $b$  с  $b'$  непосредственно нельзя. Во-первых, вследствие различия ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  между этими точками возникает короткое замыкание. Во-вторых, обмотки энергетически неэквивалентны, изменение тока на одинаковую величину приводит к различным значениям изменения мощности. Поэтому вначале

необходимо уравнивать потенциалы точек  $a$  и  $a'$ ,  $b$  и  $b'$ . Для этого реальное значение ЭДС  $E_2$  заменяют приведенным значением ЭДС  $E'_2$ , причем

$$E'_2 = E_1 = E_2 \cdot K.$$

Вместо действительного тока  $I_2$  берется его приведенное значение:

$$I'_2 = \frac{1}{K} I_2.$$

Такая замена соответствует трансформатору с одинаковым числом витков первичной и вторичной обмоток, т.е.  $K = 1$ . Также необходимо учесть, что при замене реальной вторичной обмотки приведенной энергетические соотношения в цепи вторичной обмотки остаются неизменными.

$$\begin{aligned} E_2 \cdot I_2 &= E'_2 \cdot I'_2; & U_2 \cdot I_2 &= U'_2 \cdot I'_2 \\ I_2^2 \cdot r_2 &= I'^2_2 \cdot r'_2; & I_2^2 \cdot X_2 &= I'^2_2 \cdot X'_2 \end{aligned} \quad (9)$$

Из выражений (9) следует, что

$$U'_2 = U_2 \cdot K; \quad r'_2 = r_2 \cdot K^2; \quad X'_2 = X_2 \cdot K^2.$$

Сопротивление нагрузки  $Z'_H = Z_H \cdot K^2$ .

После этих преобразований схема замещения трансформатора имеет вид (рис.5).

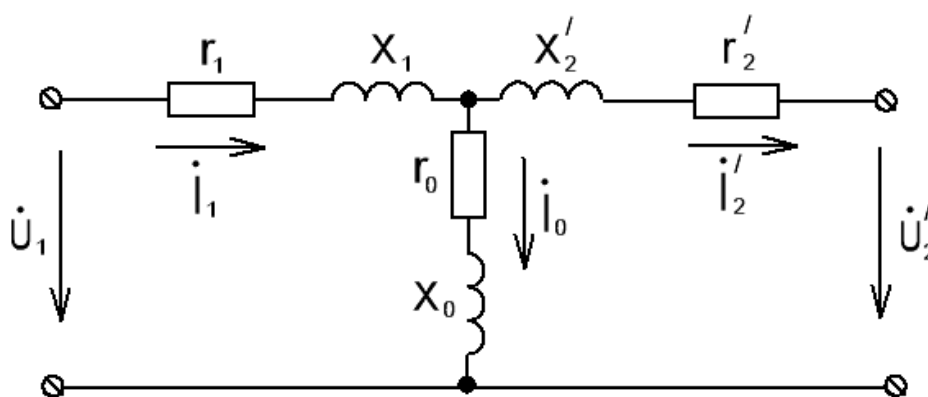


Рисунок 5 – Т-образная схема замещения трансформатора

Эта схема называется Т - образной схемой замещения трансформатора. В ней элементы  $r_0$  и  $X_0$  являются параметрами намагничивающей цепи, по ним

протекает намагничивающий ток холостого хода  $I_0$ , создающий главный магнитный поток.

T-образной схеме замещения соответствует векторная диаграмма, подобная векторной диаграмме нагруженного трансформатора.

В практических расчетах, когда не требуется большая точность, цепью холостого хода пренебрегают, полагая при этом  $I_2' = I_1$ .

Схема замещения в этом случае называется упрощенной схемой замещения трансформатора (рис. 6), ей соответствует упрощенная векторная диаграмма (рис. 7).

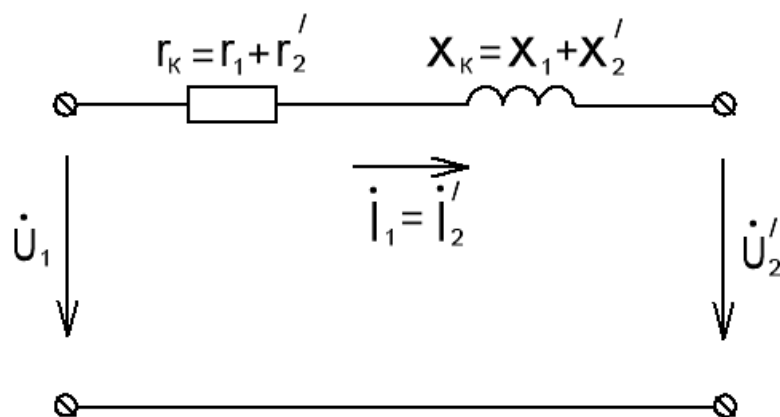


Рисунок 6 – Упрощенная схема замещения трансформатора

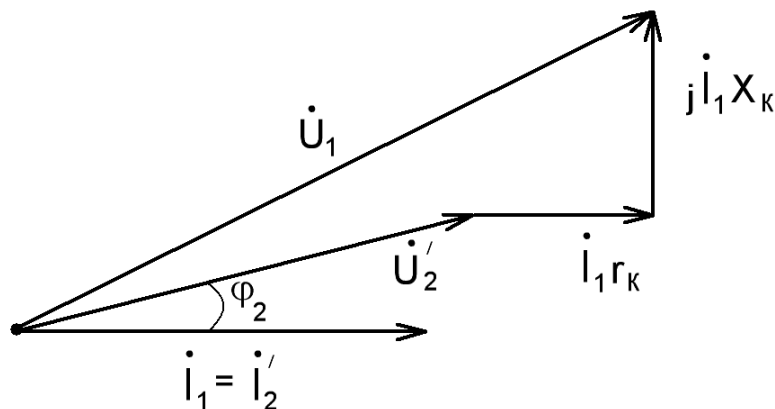


Рисунок 7 – Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

## 1.6 Изменение вторичного напряжения и внешние характеристики трансформатора

С увеличением тока нагрузки трансформатора напряжение  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки изменяется, обычно понижается. Это изменение характеризуют процентным изменением напряжения:

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

Его удобно определять при помощи готовой расчетной формулы. Обозначим арифметическую разность напряжений:

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2.$$

$\Delta U_2$  и есть изменение вторичного напряжения трансформатора с изменением нагрузки.

Если  $\Delta U_2$  известно, то

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2.$$

Приведенное значение  $\Delta U'_2 = \Delta U_2 \cdot K$

$$\Delta U'_2 = (U_{20} - U_2) \cdot K = U_1 - U'_2.$$

Для определения  $\Delta U'_2$  воспользуемся векторной диаграммой упрощенной схемы замещения трансформатора (рис 8).

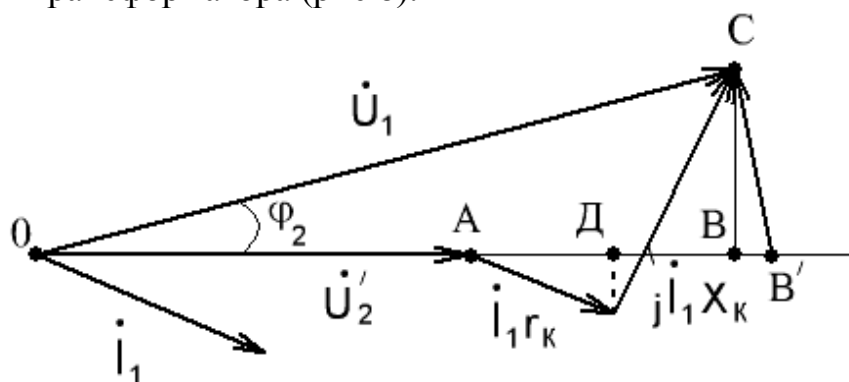


Рисунок 8 – Векторная диаграмма упрощенной схемы замещения трансформатора

Из диаграммы следует, что

$$\Delta U'_2 = OC - OA = AB' \approx AB = AD + DB = I_1 r_k \cos \varphi_2 + I_1 X_k \sin \varphi_2.$$

$$\Delta U'_2 = I_1 (r_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2).$$

Введем понятие о коэффициенте загрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}} \approx \frac{I_1}{I_{1ном}},$$

тогда

$$\Delta U_2 = \beta I_{1ном} (r_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2),$$

или

$$\Delta U_2 = \beta (U_{к.а} \cos \varphi_2 + U_{к.р} \sin \varphi_2).$$

Действительное значение напряжения на зажимах вторичной обмотки можно определить, используя выражение

$$U_2 = U_{20} - \frac{\Delta U'_2}{K}.$$

Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  или  $U_2 = f(\beta)$  при  $U_1 = U_{1ном} = const$ ,  $f = f_{ном} = const$  и  $\cos \varphi_2 = const$  называется внешней характеристикой трансформатора. В пределах  $0 \leq \beta \leq 1$  внешние характеристики практически прямолинейны (рис.9).

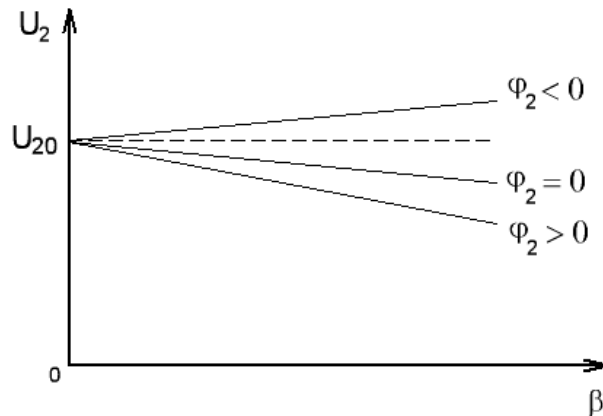


Рисунок 9 – Внешние характеристики трансформатора

При активной нагрузке  $\Delta U_2$  невелико. При активно-индуктивной нагрузке  $\Delta U_2$  возрастает быстрее и достигает максимума при  $\varphi_2 = \varphi_k$ . При активно-емкостной нагрузке ток  $I'_2$  опережает по фазе напряжение  $U'_2$ , а значение  $\Delta U_2$  может изменить свой знак, тогда  $U_2$  будет больше  $U_{20}$ .



## 1.7 Коэффициент полезного действия трансформатора

При передаче энергии из первичной обмотки во вторичную возникают электрические потери мощности в активных сопротивлениях обмоток  $\Delta P_{эл1}$  и  $\Delta P_{эл2}$ , а также магнитные потери в стали магнитопровода  $\Delta P_m$ .

Баланс активных мощностей в трансформаторе характеризует энергетическая диаграмма (рис. 10).

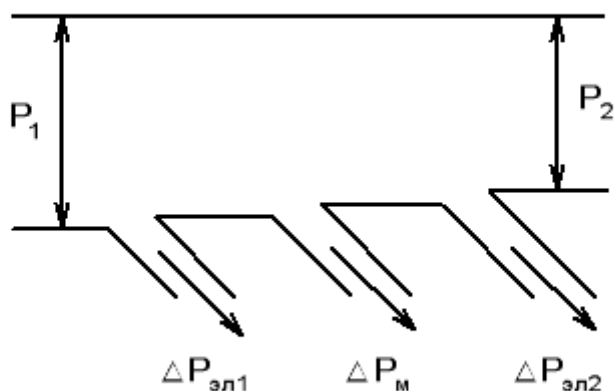


Рисунок 10 – Энергетическая диаграмма трансформатора

В соответствии с диаграммой мощность, отдаваемая трансформатором нагрузке:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{эл1} - \Delta P_{эл2} - \Delta P_m.$$

Обозначим  $\Delta P_m = P_0$ , а  $\Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = P_k$  величины, уже рассмотренные ранее. Это справедливо, т. к. в опыте холостого хода ток  $I_0$  мал и электрические потери незначительны, поэтому  $\Delta P_m = P_0$ . Т.е. потери в стали магнитопровода равны мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе и номинальном первичном напряжении.

Суммарные электрические потери:

$$\Delta P_{эл} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2' = I_2'^2 (r_1 + r_2') = I_2'^2 r_k,$$

или 
$$\Delta P_{эл} = \beta^2 I_{2ном}^2 r_k.$$

Величину  $\Delta P_{эл}$  с достаточной степени точности можно принять равной мощности  $P_k$ , потребляемой трансформатором в опыте короткого замыкания:

$$\Delta P_{эл} = \beta^2 P_k.$$

КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_1 \cos \varphi_1}, \quad (10)$$

$$P_1 = P_2 + \beta^2 P_k + P_0.$$

Тогда

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0}.$$

При  $\beta = 0$   $\eta = 0$ . При  $\beta > 0,1$  КПД резко увеличивается, достигая величины  $> 0,9$ . При некотором  $\beta_{opt}$  кривая достигает максимума, затем с увеличением  $\beta$  величина  $\eta$  начинает уменьшаться. Максимум  $\eta$  наблюдается при условии

$$\beta_{opt}^2 P_k = P_0.$$

Большой КПД имеют трансформаторы большой мощности.

## 2 Трехфазные трансформаторы

При трансформации трехфазного тока используют либо три однофазных трансформатора, либо трехфазный трансформатор с общим магнитопроводом для всех трех фаз. Трансформация трехфазного тока при помощи однофазных трансформаторов находит применение лишь в очень мощных установках энергосистем. Трансформация трехфазного тока в установках средней и небольшой мощности осуществляется при помощи трехфазных трансформаторов.

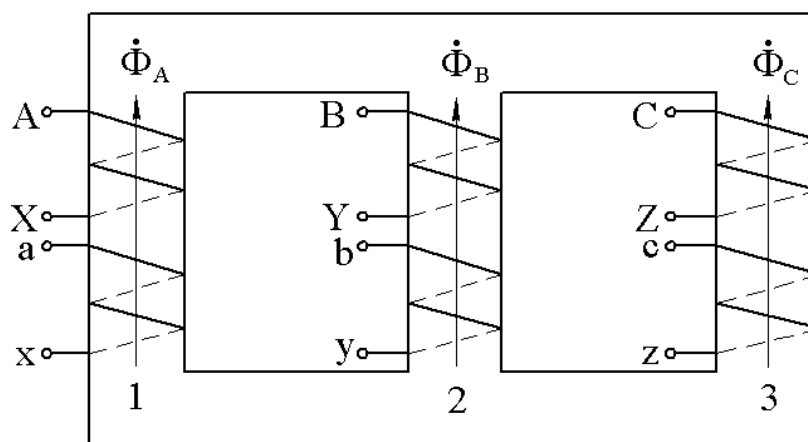


Рисунок 11 – Электромагнитная схема трехфазного трансформатора

Трехфазный трансформатор (рис. 11) представляет собой конструктивное объединение трех однофазных трансформаторов в общую систему. На каждом стержне трехстержневого магнитопровода размещены первичная и вторичная обмотки, относящиеся к одной и той же фазе. Первичная и вторичная обмотки могут быть соединены либо звездой, либо треугольником. Но для этого необходимо знать начала и концы обмоток. Начала первичных обмоток обозначают большими буквами  $A;B;C$ , их концы – также большими буквами  $X;Y;Z$ . У вторичных обмоток начала обозначают малыми буквами  $a;b;c$ , а соответствующие им концы – также малыми  $x;y;z$ . Система соединений обозначается  $Y/Y; Y/\Delta$  и т.д.

Пусть к фазам трансформатора приложены фазные напряжения  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ . Тогда в стержнях 1; 2; 3 соответственно возникают магнитные потоки  $\dot{\Phi}_A, \dot{\Phi}_B, \dot{\Phi}_C$ , пропорциональные приложенным напряжениям. Если число витков в обмотках фаз одинаково, то будут равны и амплитудные значения магнитных потоков  $\dot{\Phi}_{Am}, \dot{\Phi}_{Bm}, \dot{\Phi}_{Cm}$ . При соединении первичных обмоток звездой и подключении их к сети трехфазного напряжения возникают токи холостого хода. Амплитудные значения токов одинаковы, но векторы их сдвинуты относительно друг друга по фазе на  $120^\circ$ . Векторы магнитных потоков, создаваемые токами холостого хода, также будут сдвинуты на  $120^\circ$ . Поэтому геометрические суммы как векторов тока, так и магнитных потоков, будут равняться нулю.

Вместе с тем в плоском трехстержневом трансформаторе средняя длина магнитной силовой линии в среднем стержне меньше, чем в крайних. Это нарушает симметрию магнитопровода и приводит к тому, что намагничивающий ток обмотки среднего стержня будет несколько меньше, чем двух других обмоток. Однако асимметрия большого практического значения не имеет.

Маркировки зажимов обмоток, расположенных на разных стержнях трехфазного трансформатора, должны быть взаимно согласованы и выполнены так, чтобы положительные направления магнитных потоков во всех трех стержнях были одинаковы. В противном случае замыкание магнитных потоков  $\dot{\Phi}_A, \dot{\Phi}_B, \dot{\Phi}_C$ , согласно первому закону Кирхгофа для магнитных цепей, в трехстержневом магнитопровode невозможно.

## 2.1 Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора

Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам «звезда», «звезда с выведенной нулевой точкой», «треугольник», «зигзаг с выведенной нулевой точкой». Обычно первичную

обмотку соединяют по схеме «звезда», что позволяет при заданном линейном напряжении иметь меньшее число витков в фазе обмотки.

В первичной и вторичной обмотках, размещенных на одном и том же стержне магнитопровода, индуцируются эдс, совпадающие по фазе. Эдс, действующие между одноименными зажимами первичной и вторичной обмоток могут либо совпадать по фазе, либо быть сдвинутыми относительно друг друга на угол, кратный  $30^\circ$ . Для пояснения рассмотрим трехфазный трансформатор, обмотки которого соединены по схеме  $Y/\Delta$  (рис. 12).

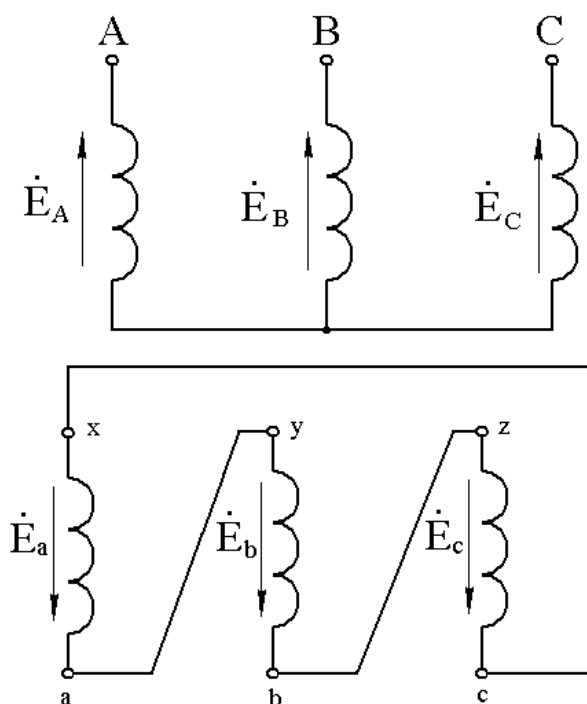


Рисунок 12 – Схема соединения обмоток  $Y/\Delta$

Векторная диаграмма трехфазного трансформатора при указанном способе соединений обмоток представлена на рис. 13. Векторы фазных эдс совпадают по фазе. Вектор линейной эдс строится как геометрическая сумма фазных эдс, встречающихся на пути обхода контура от зажима  $A$  к зажиму  $B$  (направление обхода против часовой стрелки). Вектор линейной эдс  $\dot{E}_{ab}$  вторичной обмотки совпадает по фазе с вектором фазной эдс  $\dot{E}_b$ . Тогда из векторной диаграммы следует, что угол между одноименными линейными эдс первичной и вторичной обмоток составляет  $330^\circ$ .

Если обмотки имеют одинаковую схему соединения, например  $Y/Y$ , то угол между одноименными эдс в этом случае будет составлять  $360^\circ$ .

Угол между одноименными эдс первичной и вторичной обмоток определяет так называемую группу соединений трансформатора.

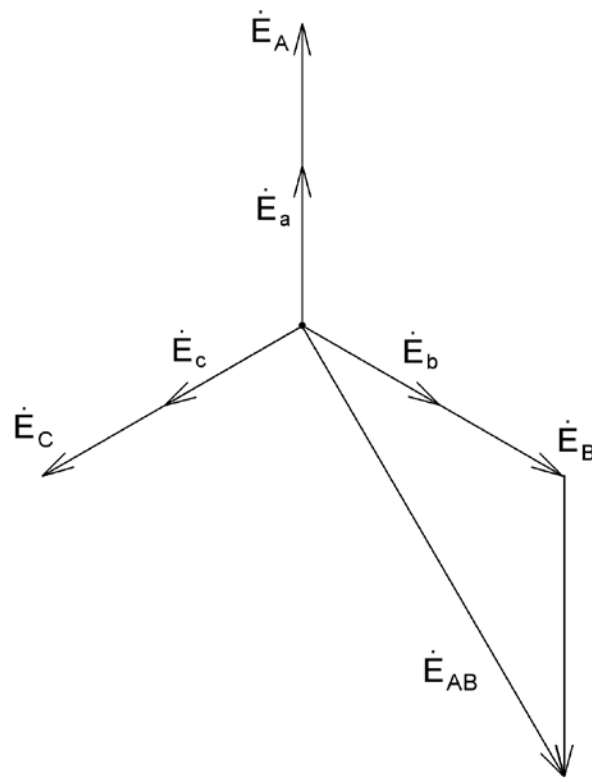


Рисунок 13 – Векторная диаграмма трехфазного трансформатора

В паспорте трансформатора группа соединений указывается не значением угла, а временем, которое будут показывать часы, когда угол между стрелками часов соответствует углу между векторами линейных напряжений первичной и вторичной обмоток. Для этого совмещают вектор линейного напряжения первичной обмотки с минутной стрелкой часов и устанавливают на цифре 12, а вектор линейного напряжения вторичной обмотки совмещают с часовой стрелкой. Тогда при соединении обмоток  $\text{Ж/}$  будем иметь группу 11, а при соединении  $\text{Y/Y} - 12$ .

В некоторых трансформаторах нейтральные точки первичной и вторичной обмоток, соединенных звездой, выводятся на крышку бака. Такое соединение обозначают  $\text{Y}_0/\text{Y}$  или  $\text{Y}/\text{Y}_0$ .

Используя разные схемы соединения обмоток, можно получить различные группы соединений. Однако большое разнообразие групп соединений оказывается неудобным при эксплуатации трансформаторов. Поэтому в большинстве случаев выпускаются трансформаторы трех групп соединений  $\text{Y/Y} - 12$ ;  $\text{Y}/\text{Y}_0 - 12$ ;  $\text{Y}/\Delta - 11$ .

В трехфазных трансформаторах различают два коэффициента трансформации:

$K_{\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}$  – коэффициент трансформации фазных напряжений,

$K_{л} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}$  – коэффициент трансформации линейных напряжений.

В зависимости от схемы соединения обмоток они могут быть как одинаковыми по величине, так и разными.

## **Порядок выполнения лабораторных работ**

Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ после ознакомления с инструкцией по технике безопасности.

Студент должен предварительно изучить описание предстоящей лабораторной работы, теоретический материал, соответствующий данной работе.

Перед выполнением каждой работы проводится проверка теоретической подготовки студента по данной теме. После разрешения студенты приступают к выполнению работы.

Напряжение питания лабораторного стенда разрешается включать только после проверки собранной исследуемой цепи ведущим преподавателем или лаборантом.

При проведении измерений перед включением источника питания измерительные приборы устанавливаются на наибольший предел измерений.

После окончания всех необходимых измерений каждое звено, не выключая исследуемую цепь и измерительные приборы, показывает преподавателю полученные экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов.

## **Требования к оформлению отчета**

Отчеты по выполненной лабораторной работе составляются и защищаются каждым студентом индивидуально.

Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы (изложена в методических указаниях);
- схему исследуемой цепи;
- основные расчетные соотношения;
- таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- графики, векторные диаграммы;
- краткие выводы по выполненной работе, содержащие сопоставление экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

При оформлении отчета обязательно соблюдение ГОСТа на буквенные и графические обозначения физических величин и элементов схем.

Графики изображаются в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат.

## Лабораторная работа № 1

### *Исследование режимов холостого хода и короткого замыкания однофазного трансформатора*

**Цель работы:** изучение предельных режимов работы и определение основных параметров однофазного трансформатора.

#### Порядок выполнения работы

1. Для исследования трансформатора  $TV_2$  в режиме холостого хода собрать электрическую цепь, представленную на рис. 14.

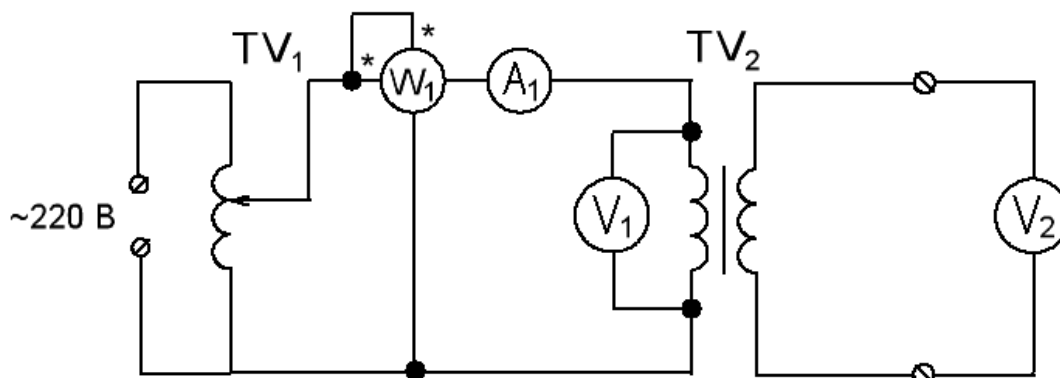


Рисунок 14 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включить питание стенда. Регулятором изменять величину напряжения  $U_{10}$ , подводимого к трансформатору, в пределах от 60 до 220 В с интервалом 40 В.

Результаты измерений занести в табл. 1.1.

По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение и отключить питание стенда.

Используя формулы, рассчитать параметры намагничивающей цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad r_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{r_0}{Z_0}; \quad K = \frac{U_{10}}{U_{20}}.$$

Таблица 1.1

№ п/п	Экспериментальные данные				Расчетные данные					
	$U_{10},$ В	$U_{20},$ В	$I_{10},$ А	$P_0,$ Вт	$Z_0,$ Ом	$R_0,$ Ом	$X_0,$ Ом	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0, ^\circ$	К
1										
2										
3										
4										
5										

По результатам измерений построить зависимости  $I_{10} = f(U_{10})$  и  $P_0 = f(U_{10})$ .

2. Для исследования трансформатора  $TV_2$  в режиме короткого замыкания собрать электрическую цепь, представленную на рис. 15, замкнув накоротко цепь вторичной обмотки трансформатора.

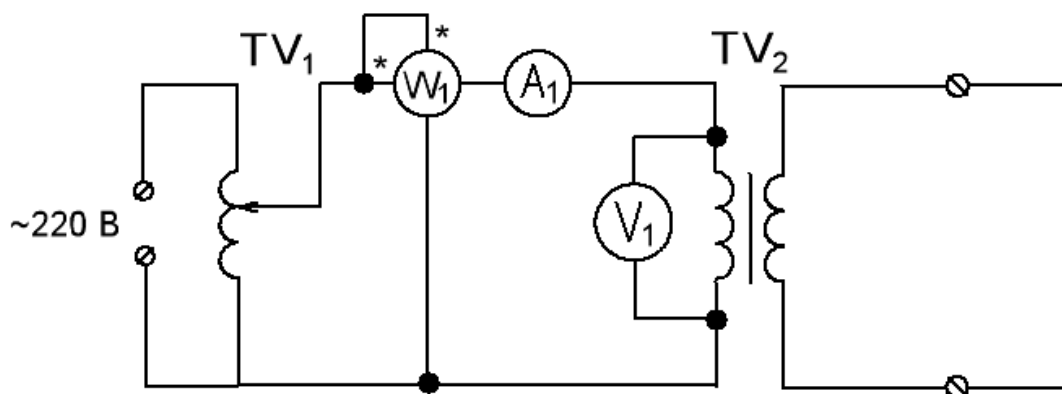


Рисунок 15 – Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включить питание стенда. Регулятором напряжения плавно увеличивать ток  $I_{1к}$  первичной обмотки трансформатора в пределах от 0,12 до 0,2 А с интервалом 0,02 А. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение и отключить питание стенда. Используя формулы, рассчитать параметры упрощенной схемы замещения трансформатора:

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; r_k = \frac{P_k}{I_{1к}^2}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}; \cos \varphi_k = \frac{r_k}{Z_k}; U_k = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{1н} = 220 В$ .



Таблица 1.2

№ п/п	Экспериментальные данные			Расчетные данные					
	$U_{Iк},$ В	$I_{Iк},$ А	$P_{Iк},$ Вт	$Z_{к},$ Ом	$R_{к},$ Ом	$X_{к},$ Ом	$\cos \varphi_{к}$	$\varphi_{к},^{\circ}$	$U_{к},$ %
1									
2									
3									
4									
5									

По результатам измерений построить зависимости  $I_{Iк} = f(U_{Iк})$  и  $P_{к} = f(U_{Iк})$ .

### Контрольные вопросы

1. Изложите принцип действия трансформатора.
2. Какую роль выполняет сердечник трансформатора?
3. Дайте определение коэффициента трансформации.
4. Как проводится опыт холостого хода трансформатора, какие параметры определяются из этого опыта?
5. Как проводится опыт короткого замыкания трансформатора, какие параметры определяются из этого опыта?
6. На что расходуется энергия, потребляемая трансформатором, в опытах холостого хода и короткого замыкания?

## Лабораторная работа № 2

### *Исследование рабочего режима однофазного трансформатора*

**Цель работы:** изучение рабочих режимов трансформатора при работе на активную и активно-емкостную нагрузку.

### Порядок выполнения работы

**1.** Для исследования трансформатора  $TV_2$  при работе на активную нагрузку собрать электрическую цепь, представленную на рис. 16.

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включить питание стенда. Регулятором напряжения установить номинальное напряжение на первичной обмотке  $U_{Iн} = 220 В$  и поддерживать его постоянным в течение опыта.

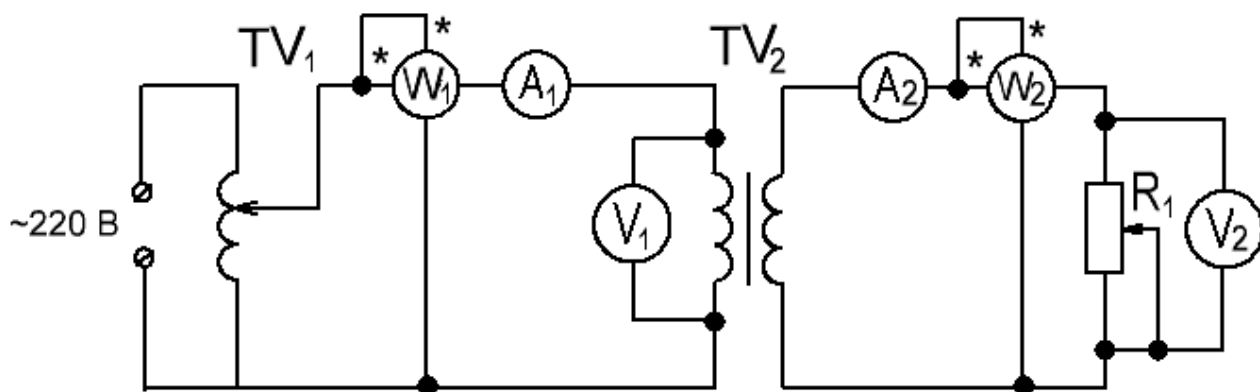


Рисунок 16 – Схема исследования трансформатора в режиме активной нагрузки

Изменяя сопротивление нагрузки  $R_1$  в пределах от максимального до минимального значений, регулировать ток вторичной обмотки от  $I_{2min}$  до  $I_{2max} = I_{2н}$  с интервалом  $0,2 A$ . Снять показания всех приборов.

Результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ п/п	Экспериментальные данные						Расчетные данные				
	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$R_n$ , Ом	$\cos \varphi_1$	$\Delta U$ , %	$\eta$ , %	$\beta$ , %
1											
2											
3											
4											
5											

По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение и отключить питание стенда.

2. Для исследования трансформатора  $TV_2$  при работе на активно-емкостную нагрузку собрать электрическую цепь, представленную на рис. 17.

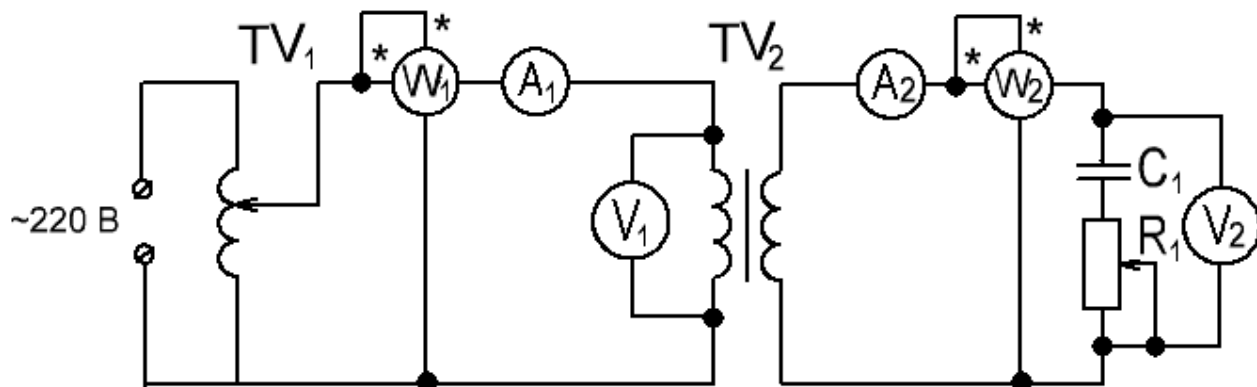


Рисунок 17 – Схема исследования трансформатора в режиме активно-емкостной нагрузки

Установить ручку регулятора напряжения в крайнее левое положение. Включить питание стенда. Регулятором напряжения установить номинальное напряжение на первичной обмотке  $U_{1н} = 220 В$  и поддерживать его постоянным в течение опыта.

Изменяя ток вторичной обмотки от  $I_{2min}$  до  $I_{2max} = I_{2н}$  с интервалом  $0,2 А$ , снять показания всех приборов.

Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

№ п/п	Экспериментальные данные						Расчетные данные				
	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$Z_n,$ Ом	$\cos \varphi_1$	$\Delta U,$ %	$\eta,$ %	$\beta,$ %
1											
2											
3											
4											
5											

По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение и отключить питание стенда.

Используя формулы, рассчитать параметры:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%; \quad \Delta U = U_{20} - U_2; \quad \beta = \frac{I_2}{I_{2н}} \cdot 100 \%,$$

где  $P_2 = U_2 I_2$ ;  $I_{2н} = 2,8 А$ .

По полученным данным построить график  $\eta = f(\beta)$  и внешние характеристики трансформатора для различных нагрузок.

Полученные результаты объяснить.

### Контрольные вопросы

1. Объясните отличие схемы замещения трансформатора от реальной схемы.
2. Начертите Т-образную и упрощенную схемы замещения трансформатора.
3. Чем объясняется различие внешних характеристик трансформатора?

# Лабораторная работа № 3

## Исследование трехфазного трансформатора

**Цель работы:** определение коэффициентов трансформации трехфазного трансформатора.

### Порядок выполнения работы

1. Соединить первичную и вторичную обмотки трехфазного трансформатора в соответствии со способом соединения обмоток, указанным в п. 1. табл. 3.1.

Таблица 3.1

№ п/п	Способы соединения обмоток	Экспериментальные данные				Расчетные данные	
		$U_{10ф}$ , В	$U_{20ф}$ , В	$U_{10л}$ , В	$U_{20л}$ , В	$K_{\phi}$	$K_{л}$
1	Y/Y						
2	Y/ $\Delta$						
3	$\Delta$ / $\Delta$						
4	$\Delta$ /Y						

2. Включить питание стенда и измерить фазные и линейные напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора. Данные занести в табл. 3.1.

3. Соединяя первичные и вторичные обмотки трансформатора в соответствии с пунктами 2; 3 и 4 табл. 3.1., измерить фазные и линейные напряжения обмоток. Данные занести в табл. 3.1.

4. На основании полученных экспериментальных данных рассчитать коэффициенты трансформации фазных напряжений ( $K_{\phi}$ ) и линейных напряжений ( $K_{л}$ ). Результаты расчетов занести в табл. 3.1.

5. Провести анализ полученных результатов.

### Контрольные вопросы

1. Объясните устройство трехфазного трансформатора.
2. Объясните схемы соединения обмоток трансформатора.
3. Почему первичная обмотка трехфазного трансформатора чаще соединяется звездой?
4. Что такое группы соединений обмоток трансформатора?
5. Объясните различие в коэффициентах трансформации для разных схем соединений обмоток.

## Литература

1. Теоретические основы электротехники / под ред. К. С. Демирчян [и др.]. – Москва : 2006. – 463 с.
2. Электротехника / под ред. В. С. Пантюшина [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1976. – 593 с.
3. Общая электротехника / под ред. А. Т. Блажкина [и др.] – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
4. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 559 с.