

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР**  
**МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА**  
**И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ**  
**ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

---

175

**Кафедра общей электротехники**

**А. Е. ЗОРОХОВИЧ, Ю. И. ЧУВЕРИН, Ю. А. АНДРЕЕВ**

## **ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР**

**Методические указания к лабораторной работе**

**Москва — 1985**

175  
МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР  
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

Кафедра общей электротехники

А. Е. ЗОРОХОВИЧ, Ю. И. ЧУВЕРИН, Ю. А. АНДРЕЕВ

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института

## ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Методические указания к лабораторной работе

по дисциплине

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

для студентов неэлектротехнических специальностей

Москва — 1985

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Основные теоретические положения	
1. Назначение и основные области применения . . . . .	4
2. Устройство . . . . .	4
3. Принцип действия . . . . .	5
4. Внешняя характеристика . . . . .	6
5. Изменение напряжения . . . . .	7
6. Приведение параметров вторичной цепи к контуру первичной цепи . . . . .	7
7. Векторные диаграммы . . . . .	8
8. Опытное определение основных параметров . . . . .	10
9. Коэффициент полезного действия . . . . .	13
Лабораторная работа. Испытание однофазного трансформатора . . . . .	15
Список литературы . . . . .	20

**Александр Ефимович Зорохович, Юрий Иванович Чуверин,  
Юрий Алексеевич Андреев**

### ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Методические указания к лабораторной работе

Редактор М. М. Тамаровская  
Техн. редактор Н. Н. Васильева  
Корректор И. Н. Терешкина

## ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящих методических указаний — помочь студентам в проведении лабораторной работы по разделу «Трансформаторы» дисциплины «Электротехника».

Студенты факультетов «Энергомеханический», «Экономический» и «Эксплуатация железных дорог» выполняют лабораторную работу полностью; студенты факультетов «Строительный», «Мосты и тоннели» и «Промышленное и гражданское строительство» — только пункты 1, 2 и 3 разд. II.

Для подготовки студентов к выполнению лабораторной работы в начале указаний приведены основные сведения по теории работы однофазного трансформатора.

---

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1. Назначение и основные области применения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока (ГОСТ—16110—70).

Трансформаторы подразделяются на следующие наиболее распространенные виды:

1) силовые трансформаторы общего назначения — используются в системах передачи и распределения электрической энергии переменного тока, а также в промышленных установках для преобразования величины напряжения;

2) преобразовательные трансформаторы, изменяющие величину напряжения, а иногда и число фаз, — предназначены для работы в выпрямительных и инверторных установках;

3) измерительные трансформаторы, изменяющие величину напряжения (трансформаторы напряжения) или тока (трансформаторы тока) с целью расширения пределов измерения электроизмерительных приборов.

### 2. Устройство

Трансформатор имеет замкнутый магнитопровод 3 из ферромагнитного материала (рис. 1), на котором расположены обмотки 1 и 2. Части магнитопровода (на которых размещены обмотки), называются стержнями, части магнитопровода без обмоток — ярмами. Обмотка, к которой подводится электрическая энергия, называется первичной, а от которой энергия отводится к потребителю — вторичной. Трансформатор, у которого число витков  $\omega_2$  вторичной обмотки меньше числа витков  $\omega_1$  первичной обмотки, называется понижающим. У повышающего трансформатора  $\omega_2 > \omega_1$ .

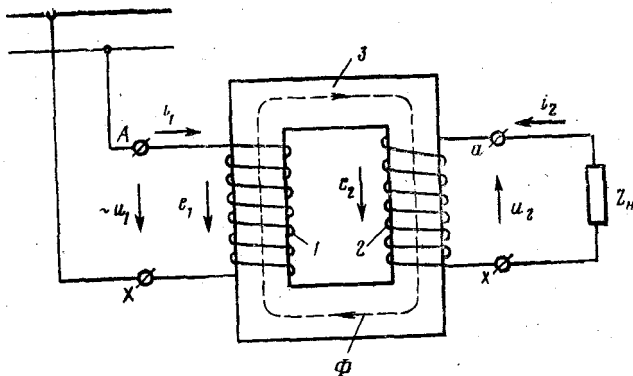


Рис. 1. Электромагнитная схема однофазного трансформатора.

Магнитопровод трансформатора для уменьшения потерь от вихревых токов выполняют из стальных изолированных пластин толщиной  $0,35 \div 0,5$  мм. Для уменьшения потерь от перемагничивания применяют электротехническую сталь с узкой петлей гистерезиса.

### 3. Принцип действия

Принцип действия трансформатора основан на явлении взаимной индукции. Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки, возбуждает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ , который пронизывает обе обмотки трансформатора (основной поток). При периодическом синусоидальном изменении магнитного потока в каждой обмотке индуцируется электродвижущая сила: в первичной —  $E_1$ , во вторичной —  $E_2$ , причем

$$E_1 = 4,44 \omega_1 f \Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44 \omega_2 f \Phi_m,$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — соответственно число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;

$f$  — частота переменного тока;

$\Phi_m$  — амплитуда основного магнитного потока.

Одним из основных параметров трансформатора является его коэффициент трансформации  $k$ , который представляет собой отношение ЭДС, индуцируемых в обмотках высшего и низшего напряжения, и равен отношению их чисел витков:

$$k = \frac{E_{вн}}{E_{нн}} = \frac{\omega_{вн}}{\omega_{нн}},$$

где  $E_{вн}$  и  $E_{нн}$  — соответственно ЭДС, индуцируемые в обмотках высшего и низшего напряжения;

$\omega_{вн}$  и  $\omega_{нн}$  — соответственно числа витков этих обмоток. Коэффициент трансформации всегда больше единицы.

#### 4. Внешняя характеристика

Внешняя характеристика трансформатора (рис. 2) представляет зависимость напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки от тока  $I_2$  во вторичной цепи при постоянном напряжении на зажимах первичной обмотки, постоянной частоте и

постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2$  нагрузки. При активно-индуктивной нагрузке силового трансформатора внешняя характеристика располагается ниже, чем при активной нагрузке. Внешняя характеристика может быть построена теоретически — по схеме замещения или же снята опытным путем.

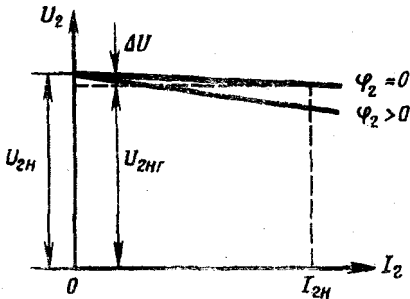


Рис. 2. Внешняя характеристика трансформатора при различном характере нагрузки

## 5. Изменение напряжения

Разность напряжений на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и при нагрузке называется изменением напряжения  $\Delta U$ . Относительное изменение напряжения при номинальной нагрузке можно определить по формуле

$$\Delta U \% = \frac{U_{2н} - U_{2нг}}{U_{2н}} \cdot 100\%,$$

где  $U_{2н}$  — вторичное напряжение холостого хода, являющееся номинальным напряжением трансформатора.

$U_{2нг}$  — напряжение при номинальной нагрузке, определяемое по внешней характеристике (см. рис. 2) соответствует номинальному току вторичной обмотки  $I_{2н}$  при определенном  $\cos \varphi_2$ .

Номинальный вторичный ток  $I_{2н}$  указан в паспорте трансформатора.

## 6. Приведение параметров вторичной цепи к контуру первичной цепи

Для удобства построения векторных диаграмм трансформатора параметры вторичной цепи приводят к параметрам первичной, т. е. вторичную цепь обмоткой, имеющей число витков  $\omega_2$ , пересчитывают на эквивалентную ей цепь с таким числом витков вторичной обмотки  $\omega_2'$ , какое имеет первичная. Приведенные величины обозначаются так же, как и действительные, но со штрихом  $E_2'$ ,  $U_2'$ ,  $I_2'$  и т. д.

В приведенном трансформаторе число витков  $\omega_2' = \omega_1$ , поэтому приведенная ЭДС  $E_2' = E_1$ .

Приведенный вторичный ток находится из условий неизменности полной мощности приведенной вторичной обмотки  $E_2' I_2' = E_2 I_2$ .

Поэтому

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{E_2}{E_2'} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \text{ или } I_2' = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Приведенное активное сопротивление вторичной обмотки определяют из условия, что электрические потери в ней при приведении не должны измениться:



$$(I_2')^2 r_2' = r_2^2 r_2,$$

откуда

$$r_2' = r_2 \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2,$$

Реактивная мощность контура вторичной обмотки при приведении тоже не должна измениться. Исходя из этого положения, определяют приведенное реактивное сопротивление  $x_2'$  вторичной обмотки:

$$(I_2')^2 x_2' = I_2^2 x_2,$$

откуда

$$x_2' = x_2 \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2.$$

## 7. Векторные диаграммы

Для трансформатора, работающего под нагрузкой, могут быть написаны следующие векторные уравнения:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \Delta \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \Delta \dot{U}_{a1} + \Delta \dot{U}_{p1}$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \Delta \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \Delta \dot{U}_{a2} - \Delta \dot{U}_{p2}.$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'),$$

где  $\Delta \dot{U}_1$  и  $\Delta \dot{U}_2'$  — полные падения напряжения в первичной и приведенной вторичной обмотках;

$\Delta \dot{U}_{a1}$  и  $\Delta \dot{U}_{a2}$  — активные составляющие падений напряжений в первичной и приведенной вторичной обмотках, причем

$$\Delta U_{a1} = I_1 r_1, \quad \Delta U_{a2} = I_2' r_2'.$$

$\Delta \dot{U}_{p1}$  и  $\Delta \dot{U}_{p2}$  — реактивные составляющие падений напряжений соответственно в первичной и приведенной вторичной обмотках, причем  $\Delta U_{p1} = I_1 x_1$ ,  $\Delta U_{p2} = I_2' x_2'$ ;

$r_1$  и  $r_2'$  — активные сопротивления: первичной и приведенной вторичной обмоток;

$x_1$  и  $x_2'$  — реактивные сопротивления: первичной и приведенной вторичной обмоток;

$I_0$  — ток первичной обмотки в режиме холостого хода.

На основании указанных уравнений строится векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой. На рис. 3,а приведена векторная диаграмма для случая активной нагрузки, а на рис. 3,б — для случая активно-индуктивной нагрузки при заданных значениях  $I_2$  и  $I_2'$ . Порядок построения этой диаграммы указан в разд. 7 лабораторной работы.

Векторная диаграмма трансформатора дает наглядное представление о соотношениях между токами, напряжениями и падениями напряжений в первичной и вторичной обмотках.

При этом величина и направление вектора тока  $I_2'$  полностью определяют при заданном значении  $U_1$  величину и положение всех остальных векторов трансформатора (при заданных коэффициентах трансформации, токе холостого хода, активных и реактивных сопротивлениях обмоток).

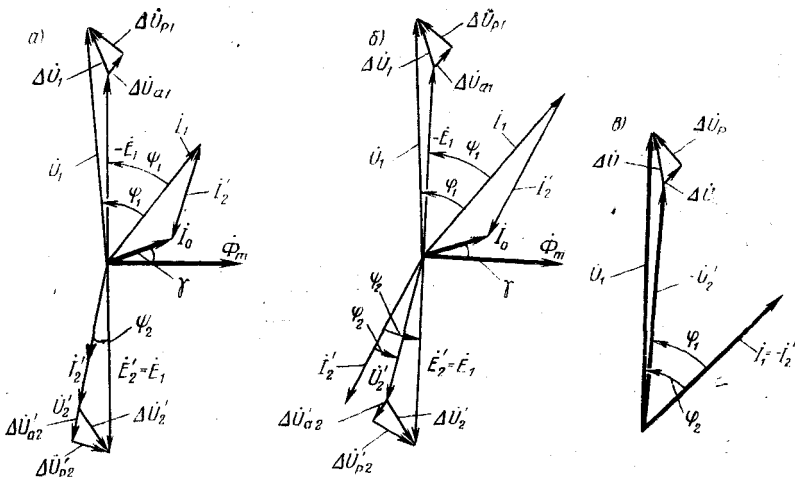


Рис. 3. Векторные диаграммы трансформатора при активной и активно-индуктивной нагрузках: а, б — полные; в — упрощенная

Если пренебречь током холостого хода  $I_0$  и принять, что  $I_1 = -I_2'$ , то векторную диаграмму, изображенную на рис. 3,а можно значительно упростить, придав ей вид, показанный на рис. 3,в, где  $\Delta U$  — полное падение напряжения в трансформаторе;  $\Delta U_a$  и  $\Delta U_p$  — его активная и реактивная составляющие, численные значения которых определяются по формулам:

$$\Delta U_a = I_2'(r_1 + r_2'); \quad \Delta U_p = I_2'(x_1 + x_2').$$

Из упрощенной векторной диаграммы трансформатора (см. рис. 3,в) можно получить (пренебрегая углом  $\varphi_1 - \varphi_2$ ):

$$U_1 - U_2' = I_2'(r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2),$$

где  $r_k = r_1 + r_2'$ ,  $x_k = x_1 + x_2'$ .

Следовательно, изменение напряжения трансформатора при любой нагрузке можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100\% = \frac{U_{1н} - U_2'}{U_{1н}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{I_2'(r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2)}{U_{1н}} \cdot 100\%. \end{aligned}$$

Следовательно,  $\Delta U$  зависит от тока нагрузки  $I_2'$  и от характера нагрузки, т. е. от  $\cos \varphi_2$ .

## 8. Опытное определение основных параметров

Для определения основных параметров трансформатора достаточно выполнить два опыта: холостого хода и короткого замыкания.

**Опыт холостого хода.** При опыте холостого хода первичная обмотка трансформатора (рис. 4,а) подключается на номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Измеряют первичное напряжение  $U_{10}$ , вторичное напряжение  $U_{20}$ , ток  $I_0$  и мощность  $P_0$ , потребляемую трансформатором. Из данных опыта холостого хода определяют: коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}},$$

### коэффициент мощности

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0}$$

и магнитные потери мощности в стали магнитопровода

$$\Delta P_{\text{магн}} = P_0.$$

При этом считают, что мощность  $P_0$ , потребляемая трансформатором при холостом ходе, целиком расходуется на компенсацию потерь мощности в стали магнитопровода (электрическими потерями мощности в первичной обмотке, создаваемыми током холостого хода  $I_0$ , пренебрегают).

На рис. 4,б изображена векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода. В связи с наличием магнитных потерь вектор тока холостого хода  $I_0$  не совпадает по фазе с вектором основного магнитного потока  $\Phi_m$ , а опережает его на угол  $\gamma = 90^\circ - \varphi_0$ .

При построении векторной диаграммы (см. рис. 4,б) из-за малости тока холостого хода  $I_0$  обычно пренебрегают падением напряжения  $I_0 z_1$  в первичной обмотке от этого тока.

Опыт короткого замыкания дает возможность определить напряжение короткого замыкания трансформатора, активные и реактивные падения напряжения в обмотках, электрические

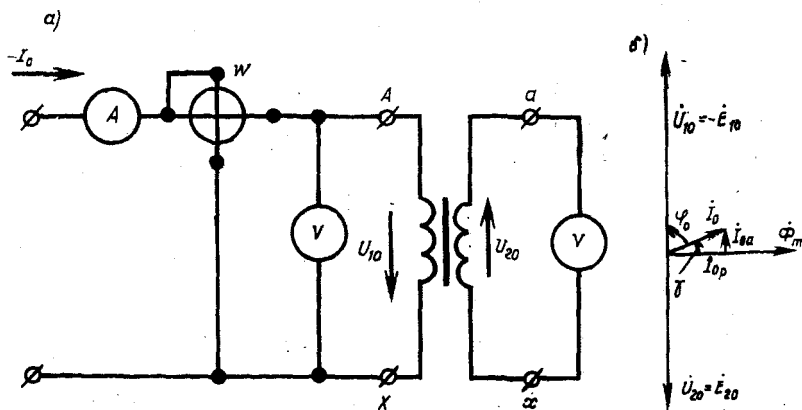


Рис. 4. Опыт холостого хода: а — схема включения приборов; б — векторная диаграмма

потери мощности в обмотках и параметры схемы замещения трансформатора при коротком замыкании  $r_k$  и  $x_k$ .

При опыте короткого замыкания (рис. 5,а) вторичную обмотку замыкают накоротко, а к первичной, во избежание перегрева и повреждения трансформатора, с помощью регулятора напряжения РН подводят пониженное напряжение такой величины, при котором токи в обмотках равны номинальным. Это напряжение  $U_k$  называют напряжением короткого замыкания.

Измеряют первичное напряжение  $U_k$ , ток  $I_k$  и мощность  $P_k$ , используя которые, можно найти параметры:

$$z_k = \frac{U_k}{I_k};$$

$$r_k = \frac{P_k}{I_k^2};$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_k}.$$

Мощность, потребляемая трансформатором при опыте короткого замыкания, расходуется преимущественно на электрические потери в обмотках трансформатора, так как при пони-

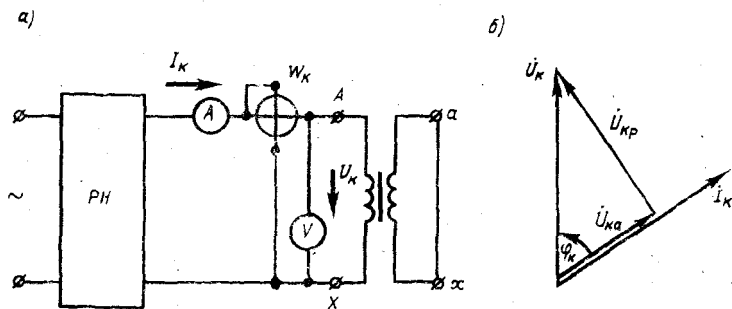


Рис. 5. Опыт короткого замыкания: а — схема включения приборов, б — векторная диаграмма

женном напряжении магнитный поток мал ( $\Phi_m \equiv U$ ), а следовательно, и магнитные потери в стали, пропорциональные квадрату магнитного потока, незначительны.

Поэтому в опыте короткого замыкания потерями в стали можно пренебречь и принять, что потребляемая трансформатором мощность в данном случае равна электрическим потерям в меди его обмоток:

$$\Delta P_{эл} = P_k.$$

Опыт короткого замыкания производится при холодном состоянии обмоток; при работе трансформатора его обмотки нагреваются, их активное сопротивление  $r_k$  и электрические потери в обмотках  $\Delta P_{эл}$  несколько увеличиваются.

На рис. 5,6 изображена векторная диаграмма трансформатора при опыте короткого замыкания, когда  $I_k = I_n$ . При этом  $U_{ка} = I_k r_k$ ,  $U_{кр} = I_k x_k$ .

## 9. Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия трансформатора

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

где  $\Delta P = \Delta P_{магн} + \Delta P_{эл}$  — сумма потерь в трансформаторе. Поэтому выражение для КПД трансформатора может быть записано в виде:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{эл} + \Delta P_{магн}}{P_2 + \Delta P_{эл} + \Delta P_{магн}}.$$

Магнитные потери в стали магнитопровода трансформатора почти не зависят от нагрузки, а электрические потери в обмотках пропорциональны проходящему по ним току в квадрате.

Для определения КПД при любой нагрузке вводится понятие коэффициента нагрузки

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{S}{S_n},$$

где  $S$  — полная мощность трансформатора при данной нагрузке;

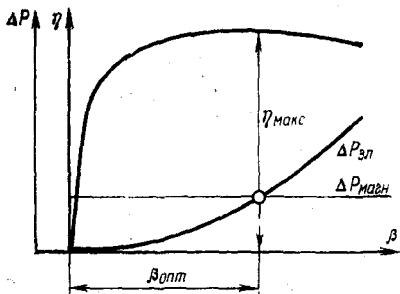


Рис. 6. Зависимость КПД и потерь мощности от коэффициента нагрузки

$S_n$  — полная номинальная мощность трансформатора.

Электрические потери в обмотках при номинальной нагрузке определяются из опыта короткого замыкания. При любой другой нагрузке они равны  $\beta^2 P_k$ . Магнитные потери в стали магнитопровода определяются из опыта холостого хода  $\Delta P_{\text{магн}} = P_0$  и от нагрузки не зависят. Поэтому формула для

КПД при номинальной частоте и напряжении принимает вид

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_k + P_0}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0} \quad (*)$$

Таким образом, определив по данным опытов холостого хода и короткого замыкания значения  $P_0$  и  $P_k$ , можно по указанной выше формуле получить для различных значений  $\beta$  зависимость  $\eta = f(\beta)$  (рис. 6).

Коэффициент нагрузки  $\beta_{\text{опт}}$ , при котором КПД имеет максимальное значение, можно определить, взяв первую производную  $\frac{d\eta}{d\beta}$  и приравняв ее к нулю. При этом получим, что

$\beta_{\text{опт}}^2 P_k = P_0$  или  $\Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{магн}}$ . Следовательно, КПД имеет максимум при такой нагрузке, когда электрические потери в меди обмоток равны магнитным потерям в стали магнитопровода. Трансформаторы стремятся проектировать так, чтобы максимальное значение КПД достигалось у них при наиболее вероятной нагрузке. Для силовых трансформаторов

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \approx \sqrt{0,5 \div 0,25} \approx 0,7 \div 0,5.$$

## II. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы** — изучить устройство однофазного трансформатора, определить коэффициент трансформации, построить его внешнюю характеристику и зависимость КПД от тока нагрузки; определить основные параметры трансформатора путем проведения опытов холостого хода и короткого замыкания; построить векторную диаграмму.

#### Порядок выполнения

1. Ознакомиться с испытуемым трансформатором и электроизмерительными приборами стенда и записать их основные технические данные.

2. Собрать электрическую схему для испытания трансформатора (рис. 7).

В цепи первичной и вторичной обмоток трансформатора включены следующие электроизмерительные приборы: вольтметры  $V_1$  и  $V_2$  для измерения первичного  $U_1$  и вторичного  $U_2$  напряжений; амперметры  $A_1$  и  $A_2$  для измерения первичного  $I_1$  и вторичного  $I_2$  токов, ваттметр  $W$  для измерения потребляемой мощности  $P_1$ .

3. Провести опыт холостого хода. Для этого разомкнуть выключателем  $B1$  цепь вторичной обмотки, подключить к источнику питания автоматическим выключателем  $AB$  регулятор напряжения  $PH$  и установить его рукояткой номинальное напряжение  $U_{10} = U_{1н}$  на первичной обмотке трансформатора. Результаты измерений записать в табл. 1.

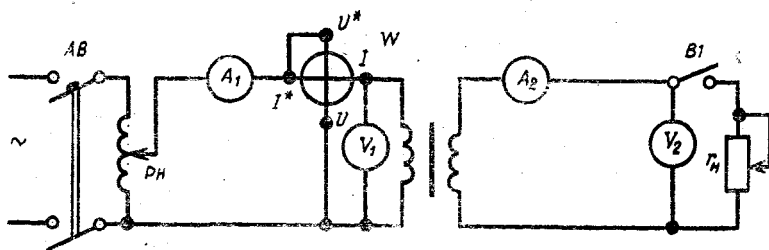


Рис. 7. Электрическая схема для испытания однофазного трансформатора



Таблица 1

Данные опыта				Данные расчета				
$U_{10}$ , В	$U_{20}$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$k$	$\cos \varphi_0$	$I_{0a}$ , А	$I_{0p}$ , А	$\Delta P_{\text{магн}} = P_0$ , Вт

4. Подключить к трансформатору активную нагрузку (включив выключатель В1) и увеличивать ее путем постепенного уменьшения сопротивления нагрузочного реостата  $r_n$ . При этом поддерживать регулятором напряжения РН номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_1 = U_{1н}$ . Произвести шесть измерений, увеличивая ток нагрузки  $I_2$  от  $I_2 = 0$  до  $I_2 = 1,25I_n$ . Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2

Данные опыта				
$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$P_1$ , Вт

5. Провести опыт короткого замыкания. Для этого подключить к первичной обмотке трансформатора вольтметр с меньшим пределом измерений; установить рукоятку регулятора напряжения РН в положение, при котором

напряжение  $U_1$  на первичной обмотке трансформатора равно нулю. Затем включить автоматический выключатель АВ, движок нагрузочного резистора  $r_n$  установить в положение, при котором его сопротивление равно нулю, замкнуть выключатель В1 и постепенно с помощью регулятора напряжения РН увеличить напряжение  $U_1$  на первичной обмотке трансформатора до тех пор, пока ток этой обмотки  $I_1$  станет равным номинальному току  $I_{1н}$ . Результаты измерений записать в табл. 3.

Таблица 3

Данные опыта			Данные расчета				
$U_k$ , В	$I_k$ , А	$P_k$ , Вт	$\cos \varphi_k$	$z_k$ , Ом	$r_k$ , Ом	$x_k$ , Ом	$\Delta P_{\text{эл}} = P_k$ , Вт

## Обработка результатов опытов и построение характеристик и векторных диаграмм

1. По данным опыта холостого хода (см. табл. 1) определить коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}}.$$

2. По данным табл. 2 построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = U_{1н}$  и  $\cos \varphi_2 = 1$ .

Определить по внешней характеристике изменение напряжения трансформатора при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_{2н}}{U_{20}} \cdot 100 \%.$$

3. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания по формуле (\*) построить зависимость КПД от коэффициента нагрузки  $\beta$ . Номинальная мощность  $S_n$  указана в паспорте трансформатора. Значения  $\beta$  принимать равными: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25.

4. По данным табл. 1 построить векторную диаграмму при холостом ходе трансформатора; угол сдвига фаз  $\varphi_0$  между векторами тока  $I_0$  и напряжения  $U_{10}$  определить по значению

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0}.$$

Составляющие тока холостого хода определяются по формулам:

$$I_{oa} = I_0 \cos \varphi_0, \quad I_{op} = I_0 \sin \varphi_0.$$

5. По данным табл. 3 определить параметры схемы замещения при коротком замыкании трансформатора:

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Полученные значения записать в табл. 5.

6. По данным табл. 3 построить векторную диаграмму короткого замыкания трансформатора. Угол сдвига фаз  $\varphi_k$  меж-

ду векторами тока  $I_k$  и напряжения  $U_k$  определить по значению  $\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_k}$ .

Составляющие напряжения короткого замыкания определяются по формулам:

$$\Delta U_{ка} = U_k \cos \varphi_k; \quad \Delta U_{кр} = U_k \sin \varphi_k.$$

7. По данным табл. 1 и 3 построить векторную диаграмму трансформатора при  $U_2 = U_{2нг}$ ,  $I_2 = I_{2н}$  для одного из двух случаев: при  $\varphi_2 = 0$  (активная нагрузка) и  $\varphi_2 = 45^\circ$  (активно-индуктивная нагрузка) — по указанию преподавателя.

Построение диаграмм производится следующим образом. Вначале располагают в произвольном направлении (например, сверху вниз) вектор напряжения  $\dot{U}'_2$  и под заданным углом  $\varphi_2$  — вектор тока  $\dot{I}'_2$ . Значения их модулей определяются по формулам:

$$U'_2 = U_{2нг} \cdot k; \quad I'_2 = I_{2н} \frac{1}{k}.$$

К вектору напряжения  $U'_2$  прибавляют векторы падений напряжения во вторичной обмотке: активного  $\Delta \dot{U}'_{a2}$  и реактивного  $\Delta \dot{U}'_{р2}$  и находят вектор ЭДС  $\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \Delta \dot{U}'_{a2} + \Delta \dot{U}'_{р2}$ . При этом вектор  $\Delta \dot{U}'_{a2}$  совпадает по фазе с вектором тока  $\dot{I}'_2$ , а вектор  $\Delta \dot{U}'_{р2}$  опережает ток  $\dot{I}'_2$  на  $90^\circ$ . Значения модулей указанных векторов принимают равными:

$$\Delta U'_{a2} = I'_2 \cdot r'_2 = I'_2 \cdot \frac{r_k}{2}; \quad \Delta U'_{р2} = I'_2 \cdot x'_2 = I'_2 \cdot \frac{x_k}{2}.$$

Затем откладывают вектор —  $\dot{E}_1$ , противоположный по фазе вектору  $\dot{E}'_2$  и равный ему по модулю, и также вектор потока  $\dot{\Phi}_m$ , опережающий вектор  $\dot{E}'_2$  на угол  $90^\circ$ . Модуль вектора  $\dot{\Phi}_m$  выбирают произвольно.

Далее откладывают вектор  $-\dot{I}'_2$  противоположный по фазе вектору  $\dot{I}'_2$ , и вектор  $\dot{I}_0$  под углом  $\varphi_0$  к вектору  $-\dot{E}_1$ . Путем сложения векторов  $\dot{I}_0$  и  $-\dot{I}'_2$  получают вектор  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$ . Для построения вектора напряжения  $\dot{U}_1$  к вектору  $-\dot{E}_1$  прибавляют векторы  $\Delta\dot{U}_{a1}$  и  $\Delta\dot{U}_{p1}$ , т. е.  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \Delta\dot{U}_{a1} + \Delta\dot{U}_{p1}$ . При этом вектор  $\Delta\dot{U}_{a1}$  совпадает по фазе с вектором тока  $\dot{I}_1$ , а вектор  $\Delta\dot{U}_{p1}$  опережает его на угол  $90^\circ$ . Значения модулей указанных векторов принимают равными:

$$\Delta U_{a1} = I_1 r_1 = I_1 \frac{r_k}{2}; \quad \Delta U_{p1} = I_1 x_1 = I_1 \frac{x_k}{2}.$$

#### ВОПРОСЫ НА КОЛЛОКВИУМЕ ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТЫ

1. Перечислите основные части однофазного трансформатора и укажите их назначение.
2. Начертите электрическую схему включения однофазного трансформатора; объясните назначение отдельных элементов схемы.
3. Что нужно сделать, чтобы увеличить мощность, отдаваемую трансформатором; что будет при этом происходить с мощностью, потребляемой трансформатором?
4. Как изменится вторичное напряжение при увеличении нагрузки трансформатора?
5. Как проводится опыт холостого хода?
6. Как проводится опыт короткого замыкания?

#### ВОПРОСЫ ПРИ СДАЧЕ ЗАЧЕТА ПО РАБОТЕ

1. Объясните принцип действия трансформатора.
2. Напишите формулу для определения ЭДС в первичной и вторичной обмотках.
3. Начертите внешнюю характеристику трансформатора при активной нагрузке и объясните, по каким причинам происходит уменьшение напряжения с ростом тока нагрузки.
4. Как определяется относительное изменение напряжения при номинальной нагрузке трансформатора?
5. Какие потери мощности возникают при работе трансформатора и от каких физических факторов они зависят?
6. Начертите зависимость КПД от нагрузки и объясните по каким причинам изменяется КПД трансформатора?

7. При какой нагрузке КПД трансформатора имеет максимальное значение?
8. Какие величины определяются при опыте холостого хода трансформатора?
9. Какие величины определяются при опыте короткого замыкания трансформатора?
10. Объясните порядок построения векторных диаграмм трансформатора при режимах холостого хода и короткого замыкания.
11. Объясните порядок построения полной векторной диаграммы трансформатора.
12. Как построить зависимость КПД трансформатора от нагрузки по данным опытов холостого хода и короткого замыкания?

Пункты 5—7 вопросов на коллоквиуме и пункты 8—12 вопросов при сдаче зачета по работе предназначены только для студентов факультетов «Энергомеханический», «Экономический» и «Эксплуатация железных дорог».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блажкин А. Т. и др. Общая электротехника. Л.: Энергия, 1979.
2. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н. Общая электротехника. М.: Высшая школа, 1974.
3. Пантюшин В. С. и др. Электротехника. М.: Высшая школа, 1976.
4. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Иванов И. И., Равдоник В. С. Электротехника. М.: Высшая школа, 1984.