

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

---

Кафедра «Электроме ханические комплексы и системы»

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов  
неэлектротехнических специальностей

Санкт-Петербург  
2011

УДК 621.3 (07)  
ББК 3 261.8 я7.

*Рецензент* – заведующий кафедрой «Электромеханические комплексы и системы» ПГУПС д.т.н., профессор В.В. Никитин

**Исследование однофазного трансформатора: метод. указания /** сост. В.М. Стрепетов, Г.Е. Серeda; ПГУПС. – СПб., 2011. – 22 с.

Методические указания соответствуют федеральному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлению подготовки Строительство (квалификация бакалавр) и специальностям Наземные транспортно-технические средства и Подвижной состав железных дорог (квалификация специалист).

В указаниях рассмотрен принцип действия и устройство однофазного трансформатора; проанализированы электромагнитные процессы, происходящие в нем, а также потери энергии, имеющие место при его работе. Основное внимание в указаниях уделено методикам исследования работы трансформатора в различных режимах и обработки результатов экспериментов.

Предназначено для выполнения лабораторных работ студентами дневной, очно-заочной и заочной форм обучения, изучающими дисциплины «Электроснабжение и основы электротехники» и «Электротехника, электроника, электропривод».

Табл. 5. Ил. 12. Библиогр.: 3 назв.

© Стрепетов В.М., Серeda Г.Е., 2011

© Петербургский государственный  
университет путей сообщения, 2011

*Авторы выражают глубокую благодарность  
ООО «ЭНЕРГОМОНТАЖ»  
в лице ее генерального директора  
Александра Федоровича Лаврентьева  
за помощь, оказанную в публикации данной работы*

*Цель работы* – ознакомление с устройством однофазного трансформатора и определение его основных параметров и характеристик.

## 1. Общие сведения

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока той же частоты, но другого напряжения.

Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электрической энергии переменного тока (силовые трансформаторы).

В электроэнергетических системах при передаче энергии от электростанций к потребителям она неоднократно преобразуется: сначала напряжение повышается, а затем снижается до значений, обеспечивающих эффективную и безопасную работу электротехнических устройств. При неизменной передаваемой мощности повышение напряжения при передаче электроэнергии ведет к уменьшению тока в линии электропередачи, что позволяет снизить расход проводникового материала и потери мощности в линии.

В электрических схемах используются следующие типы условных графических обозначений двух обмоточных однофазных трансформаторов: многолинейные (рис. 1а, 1б) и однолинейные (рис. 1в).

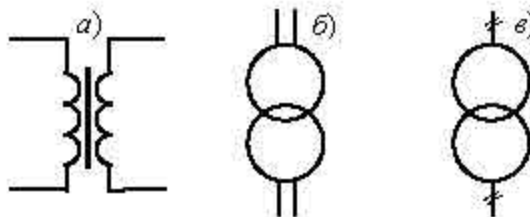


Рис. 1

Электромагнитная схема однофазного трансформатора, поясняющая его устройство и принцип действия, представлена на рис. 2.

## Устройство однофазного трансформатора

Трансформатор состоит из двух электрических обмоток 1 и 2 с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ , которые размещаются на стержнях *замкнутого ферромагнитного сердечника* (магнитопровода) 4. Обмотка трансформатора, подключенная к источнику электрической энергии, называется *первичной*. Параметры, относящиеся к первичной обмотке, обозначаются с индексом 1, например число витков –  $w_1$ . Обмотка, к которой подсоединен потребитель электроэнергии, называется *вторичной*, и ее параметры обозначаются с индексом 2.

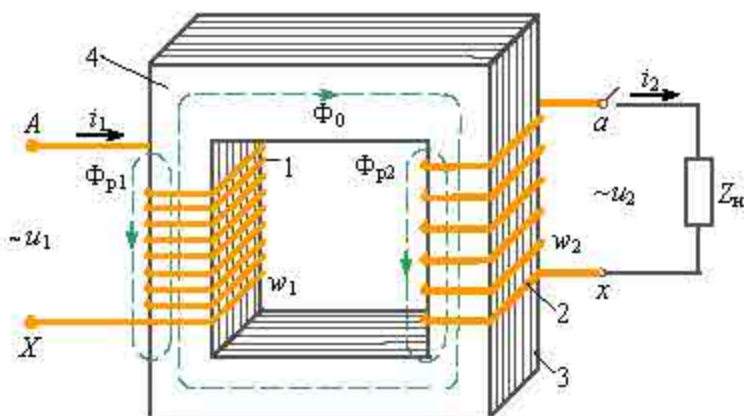


Рис. 2

Для уменьшения потерь энергии сердечник трансформатора набирается из листов 3 специальной *электротехнической* стали, толщиной 0,35-0,5 мм. Листы сердечника трансформатора изолируются друг от друга термостойким лаком.

В зависимости от положения сердечника по отношению к обмоткам принято различать *стержневые* трансформаторы (рис. 2), у которых обмотки охватывают стержни сердечника (разновидностью данного типа трансформаторов являются *торсионные* трансформаторы), и *броневые*, у которых сердечник частично охватывает обмотки.

## Принцип действия трансформатора

В основе принципа действия трансформатора лежит закон *электромагнитной индукции*. Переменный магнитный поток индуцирует в проводящем контуре ЭДС, значение которой пропорционально скорости изменения магнитного потока.

Если электрическая цепь вторичной обмотки трансформатора раз-

мкнута, а на зажимы первичной обмотки подается *переменное* напряжение  $u_1$ , то по первичной обмотке начнет протекать *переменный* ток  $i_{10}$ , который создает в окружающем пространстве *переменное* магнитное поле. Благодаря тому, что сердечник выполнен из *ферромагнитного* материала практически весь магнитный поток, созданный намагничивающей силой (НС)  $i_{10}w_1$  первичной обмотки, сосредоточен в объеме сердечника, а *замкнутая* форма сердечника обеспечивает условия, при которых витки первичной и вторичной обмоток пронизывает одинаковый магнитный поток  $\Phi_0$ . Этот поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_1$ , а во вторичной – ЭДС взаимной индукции  $e_2$ .

Относительно небольшая часть магнитного потока, создаваемого НС первичной обмотки, – поток рассеивания  $\Phi_{p1}$  сцеплен с витками только первичной обмотки.

Описанный выше процесс электромагнитных преобразований в трансформаторе при разомкнутой цепи вторичной обмотки можно представить в виде схемы (рис.3).

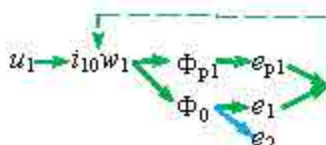


Рис. 3

Пунктирная линия на схеме отражает тот факт, что мгновенное значение тока первичной обмотки трансформатора определяется выражением

$$i_1 = (u_1 + e_1 + e_2) / r_1,$$

здесь  $r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

Если вторичную обмотку замкнуть на сопротивление нагрузки  $Z_{нв}$ , то под действием ЭДС  $e_2$  в ней начнет протекать ток  $i_2$ , который создаст магнитный поток, направленный согласно принципу Ленца *навстречу* магнитному потоку первичной обмотки. При этом ток в первичной цепи увеличивается настолько, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие тока вторичной обмотки. Следовательно, основной магнитный поток  $\Phi_0$  трансформатора при работе под нагрузкой создается совместным действием НС первичной и вторичной обмоток в соответствии с равенством

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_{10} w_1,$$

здесь  $i_{10}$  – ток холостого хода трансформатора.

Процесс электромагнитных преобразований в трансформаторе при работе под нагрузкой можно представить в виде схемы (рис. 4), где нижняя

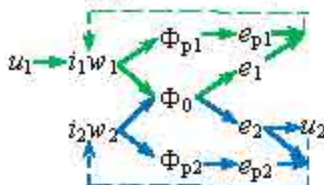


Рис. 4.

пунктирная линия обозначает, что мгновенное значение тока  $i_2$  трансформатора определяется равенством

$$i_2 = (e_2 + e_{p2} - u_2) / r_2,$$

здесь  $r_2$  – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;  $u_2$  – падение напряжения на сопротивлении нагрузки.

Из описания принципа действия трансформатора видно, что передача электрической энергии из первичной обмотки во вторичную обмотку осуществляется электромагнитным путем, посредством магнитного потока, замыкающегося по сердечнику.

Поскольку потоки рассеивания  $\Phi_{p1}$  и  $\Phi_{p2}$  (рис. 2) сцеплены с витками только одной из обмоток, то они не участвуют в процессе передачи энергии. Под действием потоков рассеивания в обмотках возникают ЭДС рассеивания, значения которых определяются равенствами

$$e_{p1} = -w_1 d\Phi_{p1} / dt = -L_{p1} di_1 / dt;$$

$$e_{p2} = -w_2 d\Phi_{p2} / dt = -L_{p2} di_2 / dt,$$

где  $L_{p1}$  и  $L_{p2}$  – индуктивности рассеивания.

ЭДС самоиндукции при анализе работы трансформатора принято учитывать в виде падений напряжения на индуктивных сопротивлениях рассеивания  $X_1$  и  $X_2$  первичной и вторичной обмотки.

### Анализ электромагнитных процессов в трансформаторе

При синусоидальном законе изменения магнитного потока мгновенные значения ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  определяются выражениями:

$$e_1 = -w_1 d\Phi_0 / dt = -2\pi f w_1 \Phi_m \cos 2\pi f t = E_{m1} \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$e_2 = -w_2 d\Phi_0 / dt = -2\pi f w_2 \Phi_m \cos 2\pi f t = E_{m2} \sin(\omega t - \pi/2).$$

Действующие значения этих ЭДС находятся из равенств

$$E_1 = E_{m1} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) f w_1 \Phi_m \cong 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = E_{m2} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) f w_2 \Phi_m \cong 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

Отношение действующих (амплитудных) значений ЭДС обмоток численно равно отношению чисел витков обмоток и называется коэффициентом трансформации,

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2.$$

Работа трансформатора *под нагрузкой* описывается двумя системами уравнений, одна из которых составлена для мгновенных значений величин, а другая для комплексов их действующих значений:

$$\left. \begin{aligned} i_1 w_1 + i_2 w_2 &= i_{10} w_1, \\ u_1 &= -e_1 + i_1 r_1 - e_{p1}, \\ e_2 &= i_2 r_2 - e_{p2} + u_2, \end{aligned} \right\} \leftrightarrow \left. \begin{aligned} \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 &= \dot{I}_{10} w_1, \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1, \\ \dot{E}_2 &= \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 + \dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{U}_2. \end{aligned} \right\} (1)$$

В системе уравнений (1)  $\underline{Z}_1$  и  $\underline{Z}_2$  — комплексы полного сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

В силовых трансформаторах падения напряжения на полных сопротивлениях  $Z_1$  и  $Z_2$  обмоток не превышают 2–3 % от соответствующих номинальных значений напряжений. Поэтому для первичной обмотки трансформатора справедливо равенство

$$U_1 \cong E_1 \cong 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при *неизменном* значении первичного напряжения и частоты питающей сети трансформатор работает при *любой* нагрузке практически с *постоянным* по величине магнитным потоком.

### Приведение трансформатора

При больших значениях коэффициентов трансформации значительно различаются не только ЭДС и токи обмоток, но и их активные и индуктивные параметры. Это обстоятельство затрудняет количественный анализ процессов в трансформаторе и построение векторных диаграмм. Чтобы избежать указанных затруднений, выполняют процедуру приведения числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки, т.е. производят замену реальной вторичной обмотки на *приведенную* обмотку с числом витков  $w_1$ .

Для обеспечения эквивалентности энергетических процессов в реальном и приведенном трансформаторе необходимо надлежащим образом рассчитать все вторичные параметры приведенного трансформатора. Так,

приведенный ток вторичной обмотки  $I'_2$ , ЭДС  $E'_2$  и сопротивления  $r'_2$  и  $X'_2$  приведенной обмотки должны быть связаны с соответствующими величинами реального трансформатора соотношениями

$$E'_2 = E_2 k; I'_2 = I_2 / k; r'_2 = r_2 k^2; \text{ и } X'_2 = X_2 k^2.$$

Из основных уравнений нагруженного трансформатора (1) с учетом приведения его параметров может быть получена Т-образная схема замещения (рис. 5).

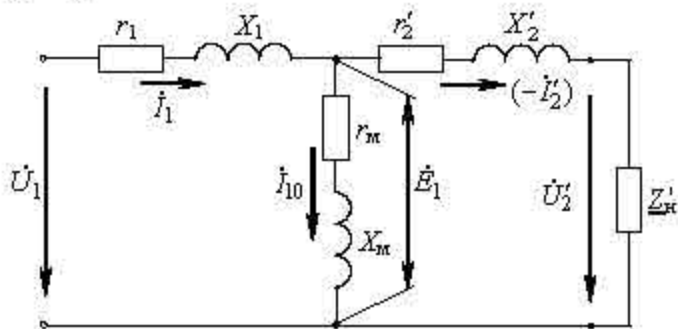


Рис. 5

В схеме замещения трансформатора электромагнитная связь между обмотками трансформатора заменяется эквивалентной гальванической связью. Параметры ветви намагничивания схемы замещения выбираются так, чтобы активное сопротивление ветви  $r_m$  определяло магнитные потери в сердечнике, а индуктивное сопротивление  $X_m$  — реактивную мощность, расходуемую на создание магнитного потока.

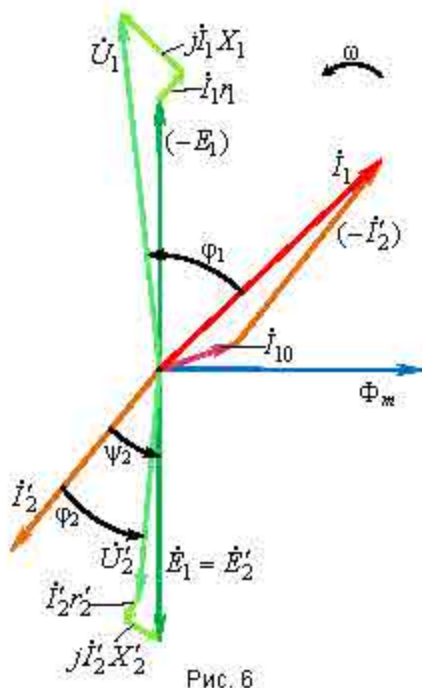
Схема замещения дает возможность построения совмещенной векторной диаграммы и значительно упрощает исследование работы трансформатора в различных режимах работы.

Пример векторной диаграммы приведенного трансформатора при активно-индуктивной нагрузке представлен на рис. 6.

### Потери энергии в трансформаторе и КПД

Работа трансформатора сопровождается магнитными и электрическими потерями. Электрические потери определяют нагрев обмоток трансформатора и зависят от квадратов токов, протекающих в обмотках. По этой причине электрические потери принято также называть переменными, которые определяются равенством

$$P_s = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2.$$



Магнитные потери связаны с перемагничиванием материала магнитопровода и возникновением в нем вихревых токов.

Суммарные удельные магнитные потери (Вт/кг) в трансформаторе находится из выражения

$$P_m = C_m f^n B_m^2, \quad (3)$$

здесь  $B_m$  – амплитуда магнитной индукции в сердечнике трансформатора;  $C_m$  – коэффициент, зависящий от частоты перемагничивания и максимального значения индукции, показатель степени  $n = 1,3-1,6$  и зависит от марки стали сердечника.

Поскольку трансформатор работает при неизменных значениях частоты и магнитного потока, магнитные потери не зависят от нагрузки и их принято также называть *постоянными*.

Коэффициент полезного действия трансформатора представляет собой отношение отдаваемой приемнику мощности  $P_2$  к получаемой из сети мощности  $P_1$ :

$$\eta = P_2 / P_1 \text{ или } \eta = (P_2 / P_1) \cdot 100\% .$$

Коэффициент полезного действия силовых трансформаторов при номинальной нагрузке достаточно высок: у трансформаторов большой мощности КПД составляет 98–99%. По этой причине КПД трансформатора определяется косвенным методом на основании прямого измерения суммарных потерь в нем  $\Delta p = p_2 + p_m$  из выражения

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Delta p) / P_1.$$

Для определения электрических и магнитных потерь в трансформаторе его испытывают в двух режимах работы: *холостом ходе* (ХХ) при номинальном напряжении и опытным *коротким замыканием* (КЗ) при номинальных токах в обмотках трансформатора и пониженном значении напряжения на первичной обмотке, а затем суммируют полученные результаты.

Преимуществом этого метода является простота и небольшая мощность, потребная при испытании, определяемая мощностью соответствующих потерь.

Опыты холостого хода и короткого замыкания позволяют получить прямо или косвенно практически все основные параметры и характеристики трансформатора: коэффициент трансформации, потери и КПД при нагрузке, сопротивления короткого замыкания, изменение вторичного напряжения и др.

## 2. Программа работы

1. Ознакомиться с устройством исследуемого трансформатора и определить тип его конструктивного исполнения (стержневой, броневой).

2. Занести в отчёт паспортные данные трансформатора:  $f$ ,  $U_{1н}$ ,  $I_{1н}$ ,  $U_{2н}$ ,  $I_{2н}$ .

3. Подобрать в соответствии с программой исследования необходимые электроизмерительные приборы и свести их данные в таблицу.

4. Выполнить опыт *холостого хода* при номинальном значении напряжения первичной обмотки трансформатора. По результатам опыта ХХ определить коэффициент трансформации и ток ХХ в процентах от номинального тока первичной обмотки, а также коэффициент мощности первичной обмотки трансформатора.

5. Выполнить опыт *короткого замыкания* при пониженном значении напряжения на первичной обмотке и номинальных значениях токов в первичной и вторичной обмотках. Используя опытные данные, определить напряжение КЗ в процентах от номинального значения напряжения первичной обмотки, параметры КЗ трансформатора и коэффициент мощности первичной цепи.

6. Исследовать трансформатор при работе на активную нагрузку

( $\varphi_2 = 0$ ). На основе опытных данных построить внешнюю характеристику, а также зависимость КПД и коэффициента мощности первичной цепи от тока вторичной обмотки. Определить изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора при номинальной нагрузке.

7\*. Исследовать трансформатор при работе на *активно-индуктивную* нагрузку ( $0 < \varphi_2 < \pi/2$ ) и *емкостную* нагрузку ( $\varphi_2 = -\pi/2$ ). По результатам опыта построить те же зависимости, что и в п.6.

8\*. Используя параметры короткого замыкания (п.5), рассчитать изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора при номинальном значении тока для случая *активно-индуктивной* и *емкостной* нагрузок. Определить величину напряжения на вторичной обмотке и выполнить построение внешних характеристик трансформатора для исследуемых типов нагрузок.

### Опыт холостого хода

Для проведения опыта холостого хода собирается схема согласно рис. 7.

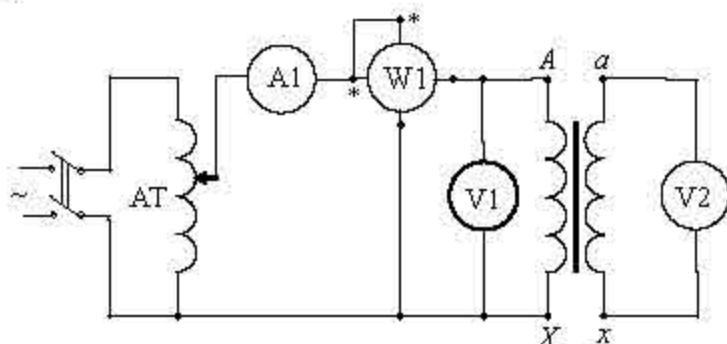


Рис. 7

С целью упрощения процесса электрических измерений в первичной цепи трансформатора возможно использование измерительного комплекта К-505. В состав комплекта входит амперметр, вольтметр и ваттметр. Для изменения пределов измерения приборов по току и напряжению в комплекте предусмотрены *поворотный* и *кнопочный* переключатели.

При выборе пределов измерения амперметра A1 и ваттметра W1 следует учесть, что ток холостого хода  $I_0$  составляет 5–10 % от номинального значения тока первичной обмотки.

\* Пункты программы №№ 7 и 8 выполняются студентами по указанию преподавателя в рамках учебно-исследовательской работы.

При разомкнутой цепи вторичной обмотки с помощью автотрансформатора АТ на зажимах первичной обмотки трансформатора устанавливается номинальное значение напряжения  $U_{1н}$  и снимаются показания приборов. Опытные данные заносятся в табл. 1.

Таблица 1

Измерено				Вычислено		
$U_{1н}$ , В	$I_{10}$ , А	$P_{10}$ , Вт	$U_{20}$ , В	$k$	$I_{10}$ , %	$\cos \varphi_{10}$

Порядок обработки результатов опыта холостого хода

1. Коэффициент трансформации

В режиме ХХ напряжение, приложенное к зажимам первичной обмотки практически равно ЭДС  $E_1$ , а напряжение на разомкнутой вторичной обмотке – ЭДС  $E_2$ , по этой причине значение коэффициента трансформации  $k$  можно определить из равенства

$$k = E_1 / E_2 \cong U_1 / U_{20};$$

2. Ток холостого хода в процентах от номинального значения тока первичной обмотки

$$I_{10} = \frac{I_{10}}{I_{1н}} \cdot 100\%;$$

3. Коэффициент мощности первичной обмотки находится из выражения

$$\cos \varphi_{10} = P_{10} / (U_{1н} I_{10});$$

4. Потери мощности в трансформаторе при ХХ.

Ввиду малой величины тока  $I_{10}$  электрическими потерями в первичной обмотке  $I_{10}^2 R_1$  можно пренебречь и считать, что показания ваттметра W1 равны магнитным (постоянным) потерям в трансформаторе  $P_{10} = P_m$ .

### Опыт короткого замыкания

Опытное КЗ выполняется при пониженном значении напряжения  $U_1$  на первичной обмотке трансформатора.

Для опыта КЗ собирается электрическая схема в соответствии с рис. 8.

Для имитации режима КЗ к зажимам вторичной обмотки трансформатора подключают амперметр А2, внутреннее сопротивление которого близко к нулю.

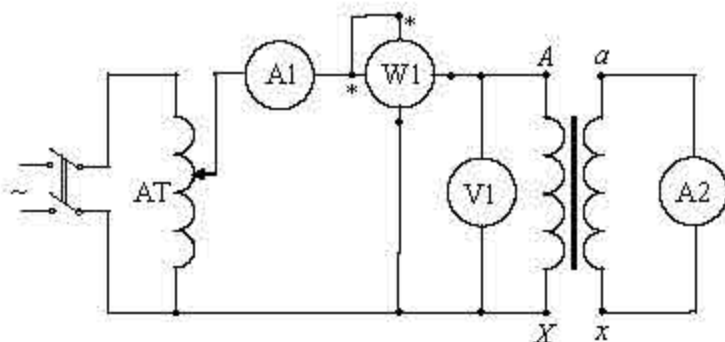


Рис. 8

Перед подачей напряжения питания на исследуемую схему необходимо убедиться в том, что движок автотрансформатора АТ находится в крайнем нулевом положении. При выполнении опыта КЗ следует также учесть, что предел измерения по напряжению вольтметра и ваттметра должен отвечать условию:  $U_1 \leq 0,1U_{1н}$ .

Плавно повышая напряжение  $U_1$  установить в обмотках трансформатора токи равные их номинальным значениям  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$  (см. паспортные данные трансформатора) и снять показания приборов.

Опытные данные записываются в табл. 2.

Таблица 2

Измерено				Вычислено					
$U_{1к}$ В	$I_{1к}$ А	$I_{2к}$ А	$P_{1к}$ Вт	$u_{1к}$ %	$I_{1у\kappa}$ А	$Z_{\kappa}$ Ом	$R_{\kappa}$ Ом	$X_{\kappa}$ Ом	$\cos\varphi_{\kappa}$

Порядок обработки экспериментальных данных опыта КЗ

1. Напряжение короткого замыкания.

Напряжение КЗ следует выразить в процентах от номинального значения первичного напряжения

$$u_{1к} = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100\%$$

Напряжение  $u_{1к}$  определяет значение аварийного тока короткого замыкания трансформатора  $I_{1у\kappa}$  в установившемся режиме

$$I_{1у\kappa} = I_{1н} \frac{100}{u_{1к}}$$

При этом максимальное значение аварийного тока КЗ или ударного тока  $I_{уд}$  при переходном процессе в трансформаторе связано с током  $I_{ук}$  равенством

$$I_{уд} = k_{уд} I_{ук},$$

где  $k_{уд} \leq 2$ .

Этот ток опасен для трансформатора из-за резкого возрастания механического взаимодействия между проводниками электрических обмоток. Поскольку сила взаимодействия между проводами пропорциональна квадрату тока, то при КЗ она возрастает в сотни раз. При аварийном КЗ обмотки также сильно перегреваются. Поэтому при проектировании трансформаторы рассчитываются на теплостойкость и механическую прочность. Ударный ток КЗ также определяет значения токов уставки аппаратов защиты цепей трансформатора.

2. *Параметры короткого замыкания* трансформатора определяются равенствами:

полное сопротивление КЗ

$$Z_k = U_{1к} / I_{1к};$$

активное сопротивление КЗ

$$R_k = r_1 + r_2' = R_{1к} / I_{1к}^2;$$

индуктивное сопротивление КЗ

$$X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Сопротивления КЗ трансформатора используются при расчёте параметров схемы замещения трансформатора, а также при определении вторичного напряжения при изменении нагрузки и построении внешней характеристики трансформатора.

3. *Коэффициент мощности* первичной цепи при КЗ

$$\cos \varphi_1 = R_{1к} / (R_{1к} I_{1к}) = R_k / Z_k.$$

4. *Параметры трансформатора.*

Приведённые к первичной обмотке активное  $r_2'$  и индуктивное  $X_2'$  сопротивления вторичной обмотки практически равны соответствующим сопротивлениям первичной обмотки. При этом значения этих сопротивлений можно определить, используя опытные параметры КЗ из соотношений

$$r_1 \cong r_2' = R_k / 2; \quad X_1 \cong X_2' = X_k / 2.$$

В свою очередь значения сопротивлений вторичной обмотки находятся из выражений

$$r_2 = r_2' / k^2; \quad X_2 = X_2' / k^2.$$

### 5. Потери мощности в трансформаторе при опыте КЗ

Согласно равенству (3) магнитные потери в трансформаторе пропорциональны квадрату амплитудного значения магнитной индукции (магнитного потока), а магнитный поток при этом в соответствии с (2) зависит от напряжения первичной обмотки. Поскольку напряжение КЗ  $U_K$  составляет 5–10% от  $U_{\text{н}}$ , то магнитными потерями при выполнении данного опыта можно пренебречь.

Таким образом, показания ваттметра W1 при выполнении опыта КЗ равны суммарным электрическим (переменным) потерям в обмотках трансформатора в номинальном режиме  $R_{\Sigma} = p_3$ .

$$R_{\Sigma} = p_3 = I_{1\text{н}}^2 r_1 + I_{2\text{н}}^2 r_2.$$

### Работа трансформаторов на активную нагрузку

Для выполнения данного опыта собирается схема в соответствии с рис. 9.

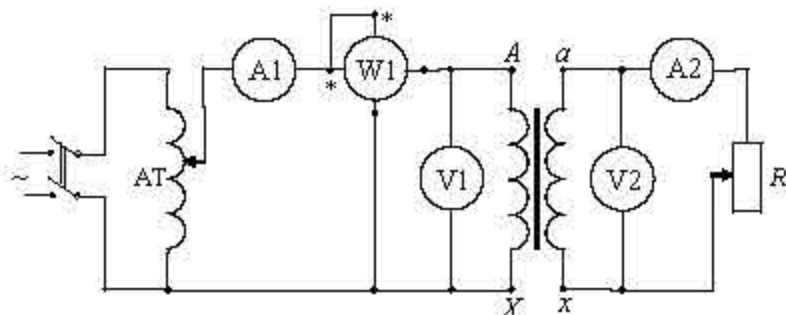


Рис. 9

В качестве нагрузки трансформатора используется реостат с активным сопротивлением  $R$ . Перед подачей напряжения на исследуемую схему следует убедиться, что сопротивление нагрузочного реостата имеет максимальное значение.

На зажимах первичной обмотки устанавливается номинальное напряжение  $U_1 = U_{\text{н}}$ , которое следует поддерживать неизменным на протяжении всего опыта.

Уменьшая сопротивление реостата, нагружают трансформатор до номинального значения тока вторичной обмотки.

Для построения исследуемых характеристик трансформатора нужно снять через равные интервалы 5–6 экспериментальных точек.

Опытные данные записываются в табл. 3. В первую строчку этой таблицы заносит результаты опыта XX из табл.1.

Таблица 3

Измерено					Вычислено			
$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$\cos \varphi_1$	$\Delta U_{2н}$ , В

Используя опытные данные, следует выполнить построение внешней характеристики – зависимости напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора от тока нагрузки  $I_2$  при неизменных значениях напряжения на первичной обмотке и коэффициента мощности нагрузки.

В отчете по данному пункту лабораторной работы также требуется построить графические зависимости КПД и  $\cos \varphi_1$  от тока  $I_2$ .

При определении активной мощности вторичной цепи используется формула

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

Качественный характер рабочих характеристик трансформатора представлен на рис. 10.

Следует заметить, что максимум КПД трансформатора имеет место при такой нагрузке, при которой электрические потери  $P_э$  в его обмотках равны магнитным потерям  $P_m$  в сердечнике. Значение этой *относительной* нагрузки определяется по данным опыта XX и КЗ из выражения

$$I_2 / I_{2н} = \sqrt{P_m / P_э}.$$

При работе трансформатора на *активную* нагрузку и *номинальном* значении тока вторичной обмотки *изменение напряжения* на вторичной обмотке трансформатора может быть определено через параметры опытов КЗ и XX из выражения

$$\Delta U_{2н} = \Delta u_{2н} U_{1н} / k,$$

здесь  $\Delta u_{2н} = u_{1к} \cos \varphi_{1к}$ ;  $\cos \varphi_{1к} = R_{1к} / U_{1к} I_{1к}$ .

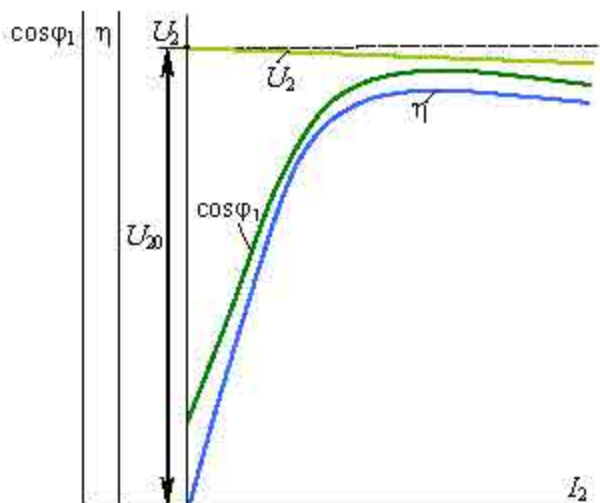


Рис. 10

Напряжение  $\Delta U_{2\kappa}$  может быть также найдено из равенства

$$\Delta U_{2\kappa} = U_{20} - U_{2\kappa}, \quad (4)$$

где  $U_{20}$  – напряжение вторичной обмотки при ХХ (см. табл. 1).

### **Работа трансформатора на активно-индуктивную и емкостную нагрузку**

Для исследования работы трансформатора на активно-индуктивную нагрузку собирается схема, представленная на рис. 11.

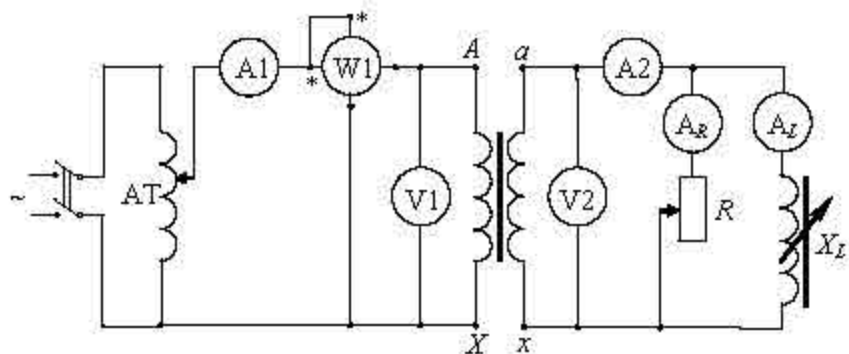


Рис. 11

В качестве нагрузки трансформатора при выполнении данного опыта используется реостат и катушка индуктивности с подвижным сердечником.

На зажимах первичной обмотки устанавливается номинальное напряжение, значение которого поддерживается неизменным в течение всего опыта.

Результаты опыта заносят в отдельную таблицу по образцу табл. 3. В первую строку этой таблицы записывают опытные данные из табл. 1.

Перед подачей питания на установку следует убедиться, что сопротивление реостата имеет максимальное значение, а сердечник катушки индуктивности полностью введены.

Уменьшая сопротивление реостата и катушки индуктивности, нагружают трансформатор до номинального значения тока вторичной обмотки. Индуктивное сопротивление катушки изменяют посредством перемещения ее сердечника.

Коэффициент мощности вторичной цепи трансформатора следует сохранять неизменным и равным  $\cos\varphi_2 = 0,8$ . Для выполнения данного условия при каждом значении тока  $I_2$  необходимо выполнять следующие соотношения между показаниями амперметров в ветвях приемника:  $I_R = 0,8 I_2$  и  $I_L = 0,6 I_2$ . По данным опыта строится внешняя характеристика трансформатора, а также зависимости КПД и  $\cos\varphi_1$  от тока  $I_2$ .

Для исследования работы трансформаторов на емкостную нагрузку ( $\varphi_2 = -\pi/2$ ) во вторичную цепь трансформатора (см. рис. 9) вместо реостата включается батарея конденсаторов с регулируемой емкостью. Увеличивая емкость, нагружают трансформатор до номинального значения тока вторичной цепи.

Опытные данные записываются в табл. 4.

Таблица 4

$I_2, A$						
$U_2, B$						

По результатам измерений следует выполнить построение внешней характеристики трансформатора.

**Определение изменения вторичного напряжения по параметрам короткого замыкания и построение внешних характеристик**

Как правило, с ростом тока нагрузки напряжение на вторичной обмотке трансформатора снижается из-за роста падения напряжения на индуктивных и активных сопротивлениях его обмоток.

Особенностью трансформатора как источника *переменного* напряжения является то, что внутреннее падение напряжения вычитается из ЭДС обмоток *векторно*, а это в отдельных случаях (при емкостном характере нагрузки) приводит даже к повышению напряжения  $U_2$  при росте нагрузки.

Из *упрощенной* векторной диаграммы напряжений *приведенного* трансформатора [1] можно получить выражение, позволяющее определить *относительное* изменение напряжения  $\Delta u_{2н}$  на вторичной обмотке трансформатора в *номинальном* режиме при *любом* типе нагрузки

$$\Delta u_{2н} = u_{ак} \cos \varphi_{2н} + u_{рк} \sin \varphi_{2н} \quad (5)$$

здесь  $\Delta u_{2н} = \Delta U_2' / U_{1н}$ ;  $\varphi_{2н}$  — коэффициент мощности нагрузки,  $u_{ак}$  и  $u_{рк}$  — активная и реактивная составляющая напряжения КЗ, значения которых определяются равенствами

$$u_{ак} = u_x \cos \varphi_x \text{ и } u_{рк} = u_x \sin \varphi_x.$$

Напряжение КЗ  $u_x$  и угол  $\varphi_x$  в свою очередь могут быть представлены через экспериментальные данные опыта КЗ (см табл. 2)

$$u_x = U_{1к} / I_{1к}; \quad \varphi_x = \arctg(R_{1к} / U_{1к} I_{1к}).$$

С учетом последнего замечания и выполнения очевидных преобразований выражение (5) окончательно принимает вид

$$\Delta u_{2н} = u_x \cos(\varphi_x - \varphi_{2н}).$$

При переходе к *абсолютным* единицам величина изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора находится из равенства

$$\Delta U_{2н} = \Delta u_{2н} U_{1н} / k.$$

При этом напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора при номинальной нагрузке  $U_{2н}$  определяется из выражения (4).

Построение внешней характеристики трансформатора выполняется по *двум* значениям напряжения  $U_2$ : в режиме ХХ ( $U_{20}$ ) и при номинальной нагрузке  $U_{2н}$ .

Расчет напряжения  $\Delta U_2$  на вторичной обмотке трансформатора требуется выполнить для следующих типов нагрузки:

- активно-индуктивной ( $\cos \varphi_{2н} = 0,8$ );
- емкостной ( $\cos \varphi_{2н} = 0$ ).

При расчете изменения напряжения для емкостной нагрузки следует учитывать знак угла сдвига фаз между током и напряжением.

Результаты расчета заносятся в табл. 5, и по ним выполняется построение внешних характеристик. Примерный вид этих характеристик представлен на рис. 12.

Таблица 5

$\varphi_{2н}$ градус	$\cos \varphi_{2н}$	$\sin \varphi_{2н}$	$\Delta U_{2н}$ В	$U_{2н}$ В	Примечание
+36,87	0,8	0,6			
-90	0	-1			

Для оценки достоверности используемого аналитического способа необходимо также выполнить построение внешних характеристик по экспериментальным точкам.

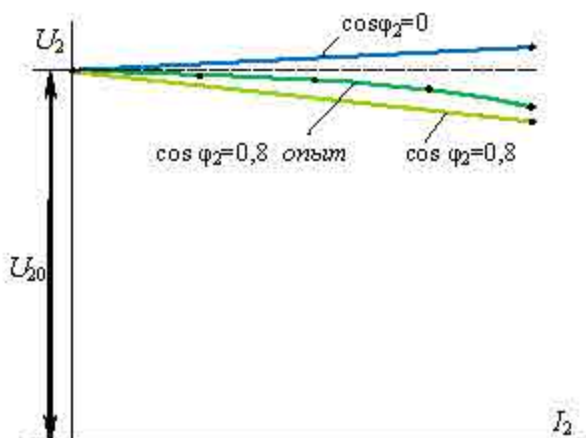


Рис. 12

Практическим примером емкостной нагрузки трансформаторов является работа его на разомкнутую линию электропередачи, представляющую собой распределенную емкость проводов относительно друг друга и земли. Особенно сильно этот эффект проявляется в кабельных линиях электропитания.

### 3. Содержание отчета

1. Цель и программа работы
2. Номинальные данные трансформатора и таблица измерительных приборов.
3. Электрические схемы выполняемых опытов.
4. Таблицы с опытными данными и результатами расчетов.
5. Графические зависимости согласно программе работы.
7. Выводы.

#### 4. Контрольные вопросы

При подготовке к защите лабораторной работы рекомендуется подготовить ответы на следующие контрольные вопросы:

1. Назначение и классификация трансформаторов.
2. Устройство и принцип действия трансформатора.
3. Работа трансформатора в режиме холостого хода.
4. Работа трансформатора под нагрузкой.
5. Приведение вторичной обмотки трансформатора.
6. Схема замещения трансформатора. Физический смысл элементов схемы замещения.
7. Виды потерь мощности и КПД трансформатора.
8. Определение параметров трансформатора из опытов ХХ и КЗ.
9. Внешняя характеристика трансформатора. Определение изменения вторичного напряжения по параметрам КЗ.

#### Библиографический список

1. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Академия, 2007.
2. Иванов И.И., Соловьев Г.И. Электротехника. – СПб: Лань, 2009.
3. Давидчук Г.А., Лебедев А.М. Электрические машины и трансформаторы: учеб. пособие. Ч. I. – СПб: ПГУПС, 2008.

## Содержание

1.	Общие сведения.....	3
	Устройство однофазного трансформатора.....	4
	Принцип действия трансформатора.....	4
	Анализ электромагнитных процессов в трансформаторе.....	6
	Приведение трансформатора.....	7
	Потери энергии в трансформаторе.....	8
2.	Программа работы.....	10
	Опыт холостого хода.....	11
	Опыт короткого замыкания.....	12
	Работа трансформатора на активную нагрузку.....	15
	Работа трансформатора на активно-индуктивную и емкостную нагрузки.....	17
	Определение изменения вторичного напряжения по параметрам короткого замыкания.....	18
3.	Содержание отчета.....	20
4.	Контрольные вопросы.....	21
	Библиографический список.....	21

СТРЕПЕТОВ Владимир Михайлович,  
СЕРЕДА Геннадий Евгеньевич

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов  
неэлектротехнического профиля

### **ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК**

Редактор и корректор Л. Г. Щёкина  
Компьютерная верстка А. В. Никифорова

Подписано в печать 03.08.2011. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 500. Заказ 8138б.

Петербургский государственный университет путей сообщения  
190031, СПб., Московский пр. 9.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного авторами,  
в типографии Издательства Политехнического университета  
195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.