

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

В.А. Соловьев, А.В. Степанов, Ю.А. Белобокова

**Исследование однофазного трансформатора
в среде *Multisim***

*Методические указания к лабораторной работе
по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника»*

Москва

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2015

УДК 621.314.2

ББК 31.261

С 60

Факультет «Фундаментальные науки»
Кафедра «Электротехника и промышленная электроника»

Соловьев В.А., Степанов А.В., Белобокова Ю.А. Исследование однофазного трансформатора в среде *Multisim*: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника». – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 30 с.

Изложены основные теоретические сведения об устройстве, принципе действия, электрической схеме замещения и основных характеристиках однофазного трансформатора. Рассмотрены методики экспериментального определения параметров его схемы замещения и основных характеристик, даны необходимые расчетные соотношения и формулы. Приведены описание модели виртуального лабораторного стенда для испытания однофазного трансформатора в среде *Multisim*, методики проведения на ней опытов по определению параметров схемы замещения и характеристик однофазного трансформатора, рекомендации по форме представления результатов экспериментов.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплины «Электротехника», «Электротехника и электроника» по программам подготовки бакалавров и специалистов.

Содержание

Введение	4
1.	0
основные теоретические сведения	5
1.1. Устройство и принцип действия трансформатора	5
1.2. Схема замещения трансформатора	8
1.3. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора	11
1.4. Внешняя характеристика трансформатора	15
1.5. Потери мощности и КПД трансформатора	16
2.	0
писание виртуальной модели лабораторного стенда для испытания однофазного трансформатора	18
3.	3
адания и порядок выполнения лабораторной работы	21
Содержание отчета	25
Контрольные вопросы	26
Основная литература.....	27
Дополнительная литература	28
Приложение 1. Заготовки для графического представления результатов экспериментального исследования характеристик однофазного трансформатора	29

Введение

В современных системах электроснабжения промышленных предприятий, бытовых объектов и многих автономных электротехнических комплексов используется переменный синусоидальный ток. Для передачи и распределения электроэнергии в этих системах, а также в источниках вторичного электропитания различных электротехнических и электронных устройств широкое применение получили силовые трансформаторы. Поэтому изучение устройства, принципа действия, основ теории, технических характеристик и методов их экспериментального определения входит в учебные планы дисциплин «Электротехника», «Электротехника и электроника» по программам подготовки бакалавров и специалистов. Освоение раздела «Трансформаторы» закрепляет знание основных законов электротехники, полученных из предыдущих разделов указанных дисциплин, и формирует базу для изучения асинхронных и синхронных электрических машин.

Цель работы: ознакомление с устройством, принципом действия, схемой замещения, основными характеристиками однофазного трансформатора; приобретение навыков экспериментального определения параметров схемы замещения и основных характеристик однофазного трансформатора на модели виртуального лабораторного стенда в среде *Multisim*.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Устройство и принцип действия трансформатора

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования посредством электромагнитной индукции переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Он состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника (магнитопровода) 1 и размещенных на нем двух (или более) обмоток 2, 3 из изолированного медного провода (рис.1).

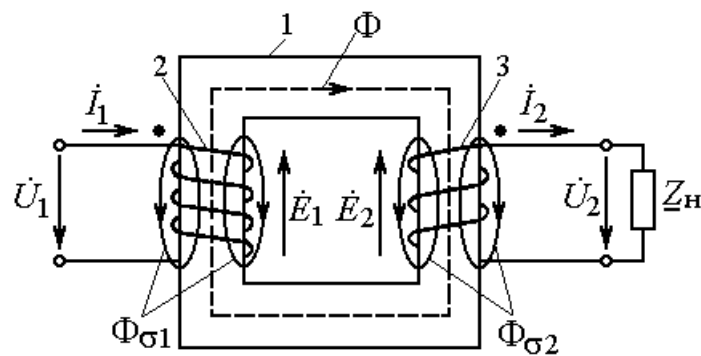


Рис.1. Принципиальная схема включения однофазного трансформатора

Сердечник трансформатора с целью снижения потерь от вихревых токов собирается из тонких, толщиной 0,35 или 0,5 мм, изолированных друг от друга листов электротехнической (трансформаторной) стали, обладающей узкой петлёй гистерезиса. Одну из обмоток трансформатора 2, называемую первичной, подключают к источнику переменного тока (сети). К другой его обмотке 3, называемой вторичной, подключают потребитель электроэнергии, т. е. нагрузку $Z_{\text{н}}$,

При разомкнутой цепи вторичной обмотки 3 (рис.1) нагрузка $Z_{\text{н}}$ отключена от трансформатора, и он работает в режиме холостого хода. Ток в его вторичной обмотке равен нулю $I_2 = 0$, а по первичной обмотке под действием напряжения источника переменного тока U_1 проходит ток холостого хода $I_1 =$

I_{1x} . Он возбуждает в трансформаторе изменяющийся по синусоидальной зависимости магнитный поток, положительное направление которого определяется по правилу буравчика. Большая часть этого магнитного потока замыкается по стали сердечника и является основным магнитным потоком трансформатора Φ , а другая значительно меньшая часть замыкается вне сердечника (по воздуху) и сцепляется только с первичной обмоткой, образуя магнитный поток рассеяния первичной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$.

Основной магнитный поток Φ пронизывает обе обмотки трансформатора и в соответствии с законом электромагнитной индукции наводит в них пропорциональные их числам витков переменные ЭДС E_1 и E_2 . Их действующие значения определяются по формулам

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m,$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m,$$

где f – частота переменного тока; w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора; Φ_m – амплитуда магнитного потока трансформатора.

При $E_1 > E_2$ трансформатор называют понижающим, а если $E_1 < E_2$, то повышающим. Отношение ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора называют коэффициентом трансформации

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

После замыкания цепи вторичной обмотки 3 (рис.1) под действием её ЭДС E_2 в ней и нагрузке Z_n возникает ток I_2 . Он возбуждает магнитный поток, направленный навстречу магнитному потоку от тока первичной обмотки I_1 . Незначительная часть этого магнитного потока замыкается вне сердечника (по воздуху), образуя магнитный поток рассеяния вторичной обмотки $\Phi_{\sigma 2}$, а большая часть замыкается по стали сердечника, и ослабляет основной магнитный поток трансформатора Φ . Однако из соотношения $U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi$ следует, что при неизменном напряжении источника переменного-

го тока $U_1 = \text{const}$ и изменении режима работы трансформатора от холостого хода до номинального его основной магнитный поток остается практически постоянным $\Phi = \text{const}$. Поскольку в нагруженном трансформаторе ЭДС E_1 наводится результирующим магнитным потоком, создаваемым обеими обмотками, для соблюдения этого условия работы трансформатора при увеличении тока нагрузки I_2 также увеличивается ток его первичной обмотки I_1 .

Физические процессы, происходящие при работе трансформатора, описываются уравнениями его магнитного и электрического состояний. Уравнение магнитного состояния отражает равенство МДС магнитной цепи трансформатора при $\Phi = \text{const}$ в режимах холостого хода и нагрузки

$$\dot{I}_{1x} w_1 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2.$$

Оно может быть представлено в форме записи первого закона Кирхгофа

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1x} + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_{1x} + \dot{I}'_2.$$

Из полученного выражения следует, что ток первичной обмотки I_1 состоит из двух составляющих I_{1x} и I'_2 . Ток холостого хода I_{1x} создает основной поток трансформатора и не зависит от его нагрузки, а ток I'_2 определяется нагрузкой трансформатора, и его изменения вызывают соответствующие изменения тока первичной обмотки I_1 .

Уравнения электрического состояния трансформатора, составленные по второму закону Кирхгофа для цепей первичной и вторичной обмоток, записываются в следующем виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1, \\ \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + R_2 \dot{I}_2 + jX_2 \dot{I}_2, \end{aligned}$$

где R_1, R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора; X_1, X_2 – индуктивные сопротивления первичной и вторичной об-

моток, обусловленные их магнитными потоками рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$; U_2 – напряжение на нагрузке трансформатора.

1.2. Схема замещения трансформатора

Наличие в трансформаторе магнитной связи между обмотками затрудняет расчет электрических цепей, в которых он является связующим звеном. Поэтому при расчете цепей переменного тока трансформатор заменяют эквивалентной электрической схемой замещения, описываемой одинаковыми с трансформатором уравнениями. При этом магнитная связь между первичной и вторичной цепями трансформатора заменяется электрической связью. Такая замена существенно упрощает не только расчет всей электрической цепи, но и облегчает анализ режимов работы и характеристик трансформатора.

В схеме замещения непосредственное подключение к первичной обмотке трансформатора цепи его нагрузки изменит на ней напряжение и потребляемую мощность и, следовательно, нарушит исходный энергетический баланс трансформатора. Чтобы избежать этого электрические параметры вторичной обмотки и нагрузки приводят к первичной обмотке, т.е. пересчитывают, используя коэффициент трансформации κ_{12} . В результате реальный трансформатор заменяют трансформатором с числом витков вторичной обмотки, равным числу витков первичной обмотки, и изменяют параметры элементов цепи вторичной обмотки так, чтобы это не отразилось на режиме работы первичной обмотки трансформатора. Приведенная ЭДС вторичной обмотки

$$E'_2 = E_1 = \kappa_{12} E_2.$$

По условию соблюдения эквивалентности проводимой замены в реальном и приведенном трансформаторах должны быть равны МДС вторичных обмоток

$$I'_2 w_1 = I_2 w_2.$$

Тогда приведенный ток вторичной обмотки

$$I'_2 = \frac{I_2}{\kappa_{12}}.$$

Приведенные активное R'_2 и индуктивное X'_2 сопротивления вторичной обмотки определяются соответственно из равенства мощностей потерь в проводниках и равенства реактивных мощностей вторичных обмоток реального и приведенного трансформаторов

$$R_2 I_2^2 = R'_2 (I'_2)^2; \quad X_2 I_2^2 = X'_2 (I'_2)^2.$$

Подобное равенство можно записать и для мощности нагрузки трансформатора

$$Z_{\text{н}} I_2^2 = Z'_{\text{н}} (I'_2)^2.$$

Из приведенных соотношений следует

$$R'_2 = \kappa_{12}^2 R_2; \quad X'_2 = \kappa_{12}^2 X_2; \quad Z'_{\text{н}} = \kappa_{12}^2 Z_{\text{н}},$$

причем последнее выражение верно и в комплексной форме записи

$$\underline{Z}'_{\text{н}} = \kappa_{12}^2 \underline{Z}_{\text{н}} = R'_{\text{н}} + jX'_{\text{н}} = \kappa_{12}^2 R_{\text{н}} + j\kappa_{12}^2 X_{\text{н}},$$

где $R_{\text{н}}, X_{\text{н}}$ – активное и реактивное сопротивления нагрузки трансформатора; $R'_{\text{н}}, X'_{\text{н}}$ – приведенные активное и реактивное сопротивления нагрузки трансформатора.

Приведенное напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U'_2 = Z'_{\text{н}} I'_2 = \kappa_{12} U_2.$$

После приведения параметров цепей вторичной обмотки основная система уравнений трансформатора принимает вид

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1\text{x}} + \dot{I}',$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1,$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + R'_2 \dot{I}'_2 + jX'_2 \dot{I}'_2.$$

Этим уравнениям соответствует Т-образная схема замещения трансформатора, представленная на рис.2.

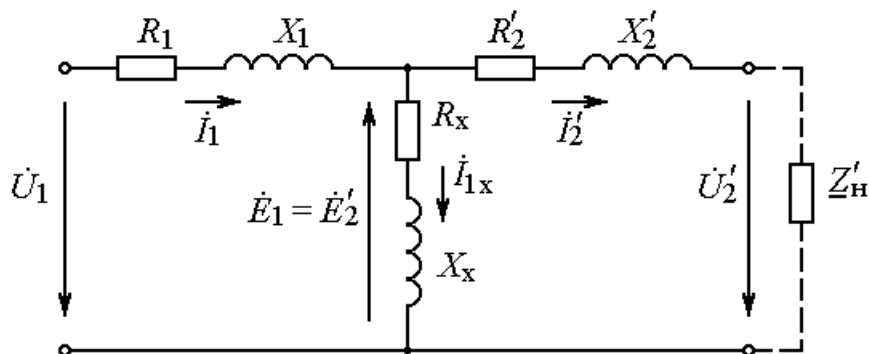


Рис.2. Т-образная схема замещения однофазного трансформатора

В ней магнитная цепь, связывающая электрические цепи обмоток трансформатора, заменена эквивалентной электрической цепью, называемой намагничивающей ветвью. Такая замена основывается на представлении ЭДС $E_1 = E'_2$ в уравнениях трансформатора падением напряжения на вводящей ветви

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = (R_x + jX_x)\dot{I}_{1x},$$

где R_x – активное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное мощностью потерь в сердечнике трансформатора из-за вихревых токов и гистерезиса; X_x – индуктивное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное основным магнитным потоком трансформатора.

Все параметры Т-образной схемы замещения трансформатора не могут быть рассчитаны или определены экспериментально. Поэтому на практике используют Г-образную схему замещения трансформатора, изображенную на рис.3.

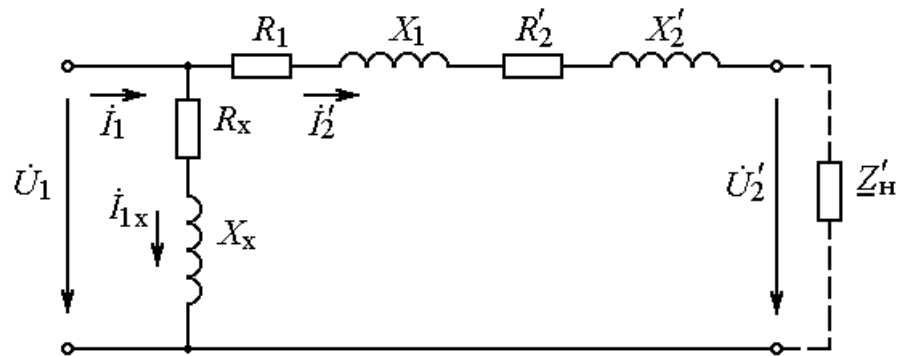


Рис.3. Г-образная схема замещения однофазного трансформатора

В ней намагничивающая ветвь с током I_{1x} перенесена на вход схемы и подключена непосредственно к источнику U_1 . Такое преобразование схемы замещения вносит некоторые погрешности при определении токов трансформатора. Однако, учитывая сравнительно малое падение напряжения на сопротивлениях R_1, X_1 , они невелики, и ими пренебрегают.

1.3. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора

Для определения параметров Г-образной схемы замещения трансформатора проводят опыты его холостого хода и короткого замыкания. Из этих опытов определяют также параметры трансформатора, позволяющие рассчитать его основные эксплуатационные характеристики. Электрическая схема лабораторного стенда для выполнения опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора показана на рис.4. Она содержит исследуемый однофазный трансформатор Т с включенными в цепи его обмоток необходимыми для проведения опытов электроизмерительными приборами и автотрансформатор АТ, используемый для регулирования напряжения на первичной обмотке трансформатора.

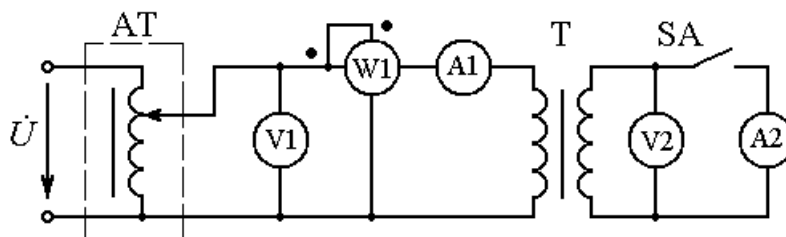


Рис.4. Схема для опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора

Опыт холостого хода трансформатора проводят при разомкнутом выключателе SA и отключенной нагрузке. На первичной обмотке трансформатора T автотрансформатором AT устанавливают, контролируя по вольтметру V1, номинальное напряжение $U_{1x} = U_{1н}$. Амперметром A1 и ваттметром W1 измеряют ток первичной обмотки I_{1x} и активную мощность P_{1x} , потребляемую трансформатором в этом режиме, а вольтметром V2 напряжение на вторичной обмотке $U_{2x} = E_2$.

По результатам измерений вычисляют коэффициент трансформации

$$k_{12} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1н}}{U_{2x}},$$

относительное значение тока холостого хода трансформатора

$$i_{1x} = \frac{I_{1x}}{I_{1н}} \cdot 100\%,$$

где $I_{1н}$ – номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

В режиме холостого хода $I_{1x} = (0,03 \dots 0,1)I_{1н}$, и только у трансформаторов малой мощности он достигает до $0,2I_{1н}$. Поэтому электрические потери мощности в первичной обмотке по сравнению с номинальным режимом незначительны, а во вторичной обмотке и вовсе равны нулю, так как $I_2 = 0$. Из этого следует, что при холостом ходе трансформатора основными потерями

мощности будут магнитные потери в его сердечнике, называемые также потерями в стали, и их показывает ваттметр W1

$$\Delta P_{\text{ст}} \approx P_{1\text{x}}.$$

По показанию ваттметра W1 можно также определить и коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе

$$\cos \varphi_{1\text{x}} = \frac{P_{1\text{x}}}{U_{1\text{x}} I_{1\text{x}}}.$$

Опыту холостого хода трансформатора, учитывая, что $I_2 = 0$, соответствует схема замещения (рис.5), содержащая только намагничивающую ветвь

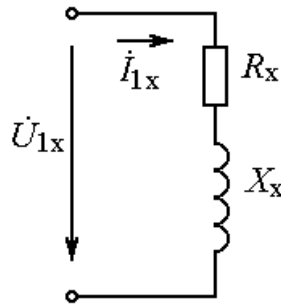


Рис.5. Схема замещения трансформатора в опыте холостого хода

Параметры ее элементов рассчитывают по формулам

$$Z_x = \frac{U_{1\text{x}}}{I_{1\text{x}}}; \quad R_x = \frac{P_{1\text{x}}}{I_{1\text{x}}^2}; \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}.$$

При проведении **опыта короткого замыкания трансформатора** необходимо учитывать, что при закорачивании вторичной обмотки замыканием выключателя SA (рис.4) и номинальном напряжении на первичной обмотке $U_1 = U_{1\text{н}}$ в обмотках трансформатора возникают токи, многократно превышающие их номинальные значения, и реальный трансформатор может выйти из строя. Поэтому перед этим опытом предварительно понижают напряжение на первичной обмотке трансформатора до $U_1 = 0$ В, и только после этого закорачивают выключателем SA его вторичную обмотку. Затем автотрансфор-

матором АТ постепенно повышают, контролируя по вольтметру V1, напряжение на первичной обмотке трансформатора до $U_1 = U_{1к}$, при котором токи в его обмотках, измеряемые амперметрами А1, А2, будут равны их номинальным значениям

$$I_{1к} = I_{1н} = \frac{S_H}{U_{1н}}; \quad I_{2к} = I_{2н} = \frac{S_H}{U_{2н}},$$

где S_H – номинальная полная мощность трансформатора.

При напряжении $U_1 = U_{1к}$ ваттметром W1 измеряют потребляемую трансформатором активную мощность $P_{1к}$. Используя показания приборов, рассчитывают относительно значения напряжение короткого замыкания трансформатора

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

и его коэффициент мощности в этом режиме

$$\cos \varphi_{1к} = \frac{P_{1к}}{U_{1к} I_{1к}}.$$

Напряжение короткого замыкания трансформаторов $U_{1к}$ в 10...20 и более раз меньше их номинального напряжения $U_{1н}$. Поэтому основной магнитный поток в сердечнике трансформатора, пропорциональный напряжению $U_{1к} \approx E_{1к} = 4,44w_1 f \Phi_m$, будет очень мал. Тогда потери в стали, пропорциональные квадрату магнитного потока, будут пренебрежимо малы, и их можно не учитывать. Следовательно, вся активная мощность $P_{1к}$, потребляемая трансформатором в опыте короткого замыкания, идет на нагрев обмоток и равна электрическим потерям мощности в них или потерям в меди ΔP_m . Эти потери мощности измеряются при номинальных токах обмоток трансформатора и являются номинальными потерями мощности в меди

$$\Delta P_{мн} = P_{1к} = R_1 I_{1н}^2 + R_2 I_{2н}^2 \approx (R_1 + R_2') I_{1н}^2.$$

В опыте короткого замыкания трансформатора при $U_{1к} \ll U_{1н}$ ток в намагничивающей ветви Г-образной схемы замещения очень мал, поэтому ее из схемы замещения исключают (рис.6)

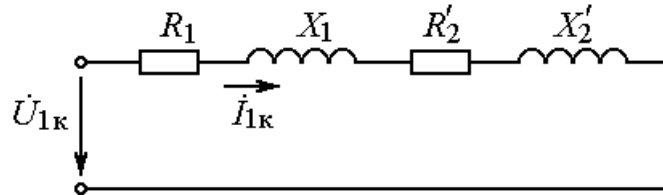


Рис.6. Схема замещения трансформатора в опыте короткого замыкания

Параметры схемы замещения трансформатора в опыте короткого замыкания определяют по формулам

$$Z_{к} = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; \quad R_{к} = R_1 + R'_2 = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; \quad X_{к} = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_{к}^2 - R_{к}^2}.$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{к}}{2}; \quad X_1 = X'_2 = \frac{X_{к}}{2}.$$

1.4. Внешняя характеристика трансформатора

При нагружении трансформатора вследствие падения напряжения на сопротивлениях его обмоток с изменением тока нагрузки изменяется напряжение на вторичной обмотке. Зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_2 = \text{const}$ называют внешней характеристикой трансформатора. Относительное значение изменения вторичного напряжения трансформатора выражают в процентах

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{2х} - U_2}{U_{2х}} \cdot 100\% = \frac{U_{1н} - U_2'}{U_{1н}} \cdot 100\%.$$

Из схемы замещения трансформатора (рис.3) и соответствующей ей векторной диаграммы при пренебрежении током I_{1x} следует

$$U_{1н} - U'_2 = I_1(R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2).$$

С учетом этого равенства внешняя характеристика трансформатора может быть выражена зависимостью

$$U_2 = U_{2x} - \beta \frac{I_{2н}}{K_{12}} (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2),$$

где $\beta = I_2 / I_{2н} \approx I_1 / I_{1н}$ – коэффициент загрузки трансформатора.

Изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, как следует из выражения его внешней характеристики, зависит не только от тока нагрузки I_2 , но и от ее характера, т.е. угла φ_2 . При активной нагрузке $\varphi_2 = 0$, при активно-индуктивной нагрузке угол φ_2 положительный, а при активно-емкостной нагрузке φ_2 отрицательный. Поэтому при работе трансформатора с активной и активно-индуктивной нагрузкой напряжение U_2 снижается с увеличением тока I_2 , причем более интенсивно при работе с активно-индуктивной нагрузкой, а при активно-емкостной нагрузке напряжение U_2 может увеличиваться.

1.5. Потери мощности и КПД трансформатора

Преобразование электроэнергии в трансформаторе сопровождается потерями мощности, называемые по месту их возникновения потерями мощности в стали (сердечнике) $\Delta P_{ст}$ и потерями мощности в меди (обмотках) $\Delta P_{м}$. Мощность потерь в стали, как и амплитуда магнитного потока Φ_m , при $U_1 = U_{1н} = \text{const}$, $f = \text{const}$ практически не зависит от нагрузки трансформатора и относится к постоянным потерям мощности

$$\Delta P_{ст} = \text{const}.$$

Мощность потерь в меди зависит от степени загрузки трансформатора и образует переменную составляющую его мощности потерь

$$\Delta P_M = R_k (I_2')^2 = \beta^2 \Delta P_{MH}.$$

Эффективность преобразования электроэнергии в трансформаторе оценивается по его КПД

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

где $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – активная мощность, потребляемая трансформатором из сети; $\cos \varphi_1$ – коэффициент мощности трансформатора; P_2 – активная мощность, отдаваемая трансформатором в нагрузку; $\Delta P = \Delta P_{ст} + \Delta P_M$ – мощность потерь трансформатора.

КПД трансформатора очень высок. Поэтому, принимая во внимание, что относительная разность мощностей P_1 и P_2 соизмерима с погрешностью измеряемых их приборов, для определения КПД трансформатора рекомендован косвенный метод, основанный на измерении мощностей потерь. Тогда, учитывая, что

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_H \cos \varphi_2,$$

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{MH} + \Delta P_{ст}}.$$

Это выражение представляет собой функцию $\eta = f(\beta)$, имеющую максимум $\eta = \eta_{\max}$ при оптимальном коэффициенте загрузки трансформатора

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{ст}}{\Delta P_{MH}}} = \sqrt{\frac{P_{1X}}{P_{1K}}}.$$

Значению $\beta = \beta_{\text{опт}}$ соответствует равенство переменных и постоянных потерь мощности трансформатора

$$\beta_{\text{опт}}^2 \Delta P_{\text{мн}} = \Delta P_{\text{ст}}.$$

Трансформаторы силовых сетей, работающие на переменную нагрузку, имеют максимум КПД обычно при $\beta_{\text{опт}} = 0,5 \dots 0,7$.

2. Описание виртуальной модели лабораторного стенда для испытания однофазного трансформатора

В лабораторной работе исследуется однофазный трансформатор ОСМ1 0,63 – 220/42. Он предназначен для питания различной аппаратуры в промышленных электроустановках общего назначения. Его паспортные данные: $U_{1\text{н}} = 220 \text{ В}$, $I_{1\text{н}} = 2,86 \text{ А}$, $S_{\text{н}} = 630 \text{ ВА}$, $U_{2\text{н}} = 42 \text{ В}$, $I_{2\text{н}} = 15 \text{ А}$.

Виртуальная модель лабораторного стенда для испытания однофазного трансформатора с включенными в его цепи виртуальными электроизмерительными приборами и нагрузочными устройствами находится в файле <Однофазный трансформатор_ОСМ1-0,63> среды NI Multisim 10.1. Ее изображение после открытия этого файла показано на рис.7.

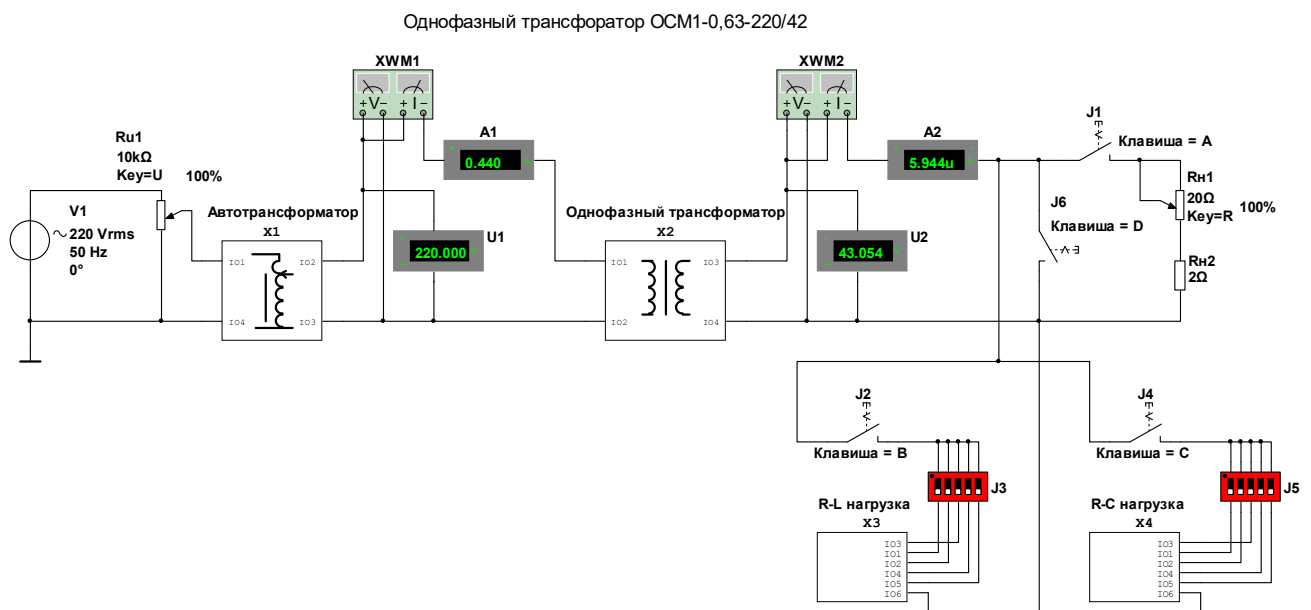


Рис.7. Виртуальная модель лабораторного стенда для испытания однофазного трансформатора

В модели виртуального лабораторного стенда исследуемый трансформатор представлен субмоделью «Однофазный трансформатор», содержащей четыре вывода. Их них два вывода являются выводами первичной обмотки трансформатора, а два других выводами вторичной обмотки. В цепи обеих обмоток трансформатора включены электроизмерительные приборы. Вольтметр $U1$ показывает напряжение на первичной обмотке трансформатора U_1 , амперметр $I1$ ее ток I_1 , а ваттметр XWM1 потребляемую трансформатором активную мощность P_1 и его коэффициент мощности $\cos\varphi_1$. Такие же электроизмерительные приборы включены и в цепь вторичной обмотки трансформатора. Напряжение на этой обмотке U_2 измеряет вольтметр $U1$, ток нагрузки I_2 показывает амперметр $I2$, а потребляемую нагрузкой активную мощность P_2 и ее коэффициент мощности $\cos\varphi_2$ ваттметр XWM2.

Питание первичной обмотки трансформатора осуществляется от регулируемого источника переменного напряжения. Он состоит из источника переменного напряжения $V1$ с напряжением $U = 220\text{В}$ и частотой $f = 50$ Гц, субмодели автотрансформатора «Автотрансформатор» и потенциометра $Ru1$, при помощи которого регулируют выходное напряжение автотрансформатора, подаваемое на первичную обмотку исследуемого трансформатора. Необходимое напряжение на первичной обмотке трансформатора устанавливают перемещением мышью движка слайдера около потенциометра $Ru1$ или очередным нажатием клавиши «U» («Shift +U»).

В режиме нагрузки к вторичной обмотке трансформатора могут быть подключены нагрузочные устройства с активным, активно-индуктивным и активно-емкостным характером сопротивления. Нагрузочное устройство с активным характером сопротивления состоит из соединенных последовательно реостата $Rn1$ и резистора $Rn2$. Сопротивление реостата можно изменять перемещением мышью движка слайдера около этого резистора или очередным нажатием клавиши «R» («Shift +R»). Цепь $Rn1, Rn2$ подключают к вторичной обмотке трансформатора замыканием кнопочного выключателя

11. Изменение положения этого выключателя может быть произведено нажатием клавиши «А» или наведением курсора мыши на его изображение и последующим нажатием левой кнопки мыши.

Для подключения к вторичной обмотке трансформатора нагрузочных устройств с активно-индуктивным и активно-емкостным характером сопротивления используют кнопочные выключатели J2 и J4, а замыкание вторичной обмотки накоротко выполняют кнопочным выключателем J6. Изменение положения этих выключателей осуществляют нажатием клавиш, соответственно, «В», «С» и «D» или мышью, как указано для кнопочного выключателя J1.

Нагрузочное устройство с активно-индуктивным характером сопротивления состоит из субмодели «RL – нагрузка» и пакетного выключателя J3, а нагрузочное устройство с активно-емкостным характером сопротивления из субмодели «RC – нагрузка» и пакетного выключателя J5. Субмодель «RL – нагрузка» содержит пять электрических цепей с последовательно соединенными активным и индуктивным элементами. Общая точка соединения этих цепей подключена к одному из выводов вторичной обмотки трансформатора, а их свободные выводы присоединены к независимым однополюсным выключателям пакетного выключателя J3, подключающих их к кнопочному выключателю J2.

Субмодель «RC – нагрузка» содержит пять электрических цепей с последовательно соединенными активным и емкостным элементами, общая точка соединения которых подключена к одному из выводов вторичной обмотки трансформатора. Свободные выводы этих цепей присоединены к однополюсным выключателям пакетного выключателя J5, при помощи которых они подключаются к кнопочному выключателю J4.

Однополюсные выключатели пакетных выключателей J3, J5, используемые для дискретного изменения сопротивления нагрузки трансформатора, находятся в отключенном состоянии при расположении их движков около черной точки на изображении соответствующего пакетного выключателя.

Каждый из однополюсных выключателей пакетного выключателя может включаться и выключаться. Для перевода отдельного однополюсного выключателя во включенное состояние необходимо поместить на этот однополюсный выключатель курсор мыши, принимающий форму руки и, нажав левую кнопку мыши, переместить движок выключателя в другое положение.

Аналогичные действия выполняют и при отключении однополюсного выключателя.

3. Задания и порядок выполнения лабораторной работы

Открыть файл <Однофазный трансформатор_ОСМ1-0,63>.

Задание 1. Провести опыт холостого хода трансформатора

1. Разомкнуть кнопочные выключатели J1, J2, J4 и J6.
2. Включить режим моделирования. Для этого необходимо навести на кнопку с треугольником, расположенную в панели меню, курсор мыши, и нажать ее левую кнопку или навести курсор на изображение выключателя в правом верхнем углу рабочего окна, и нажать левую кнопку мыши.
3. Установить потенциометром Ru1 на первичной обмотке трансформатора напряжение $U_1 = U_{1н}$.
4. После окончания процесса моделирования записать показания приборов в табл.1.
5. Рассчитать параметры трансформатора κ_{12} , i_{1x} , $\Delta P_{ст}$ и его схемы замещения Z_x , R_x , X_x . Полученные результаты записать в табл.1.

Таблица 1

Результаты опыта холостого хода трансформатора

Результаты измерений					Результаты вычислений					
U_{1x}	I_{1x}	P_{1x}	$\cos\varphi_{1x}$	U_{2x}	κ_{12}	i_{1x}	$\Delta P_{ст}$	Z_x	R_x	X_x
В	А	Вт	–	В	–	%	Вт	Ом	Ом	Ом

Задание 2. Провести опыт короткого замыкания трансформатора

1. Установить потенциометром Ru1 на первичной обмотке трансформатора напряжение $U_1 = 0$ В.
2. Замкнуть кнопочный выключатель J6.
3. Постепенно увеличивая потенциометром Ru1 напряжение на первичной обмотке трансформатора установить такое его значение, при котором токи в обмотках трансформатора примут значения $I_{1к} \approx I_{1н}$ и $I_{2к} \approx I_{2н}$.
4. Записать полученные показания приборов в табл.2.
5. Отключить кнопочный выключатель J6.
6. Рассчитать параметры трансформатора $u_{1к}$, $\Delta P_{мн}$ и его схемы замещения Z_k , R_k , X_k . Полученные результаты записать в табл.2.

Таблица 2

Результаты опыта короткого замыкания трансформатора

Результаты измерений					Результаты вычислений				
$U_{1к}$	$I_{1к}$	$P_{1к}$	$\cos\varphi_{1к}$	$I_{2к}$	$u_{1к}$	$\Delta P_{мн}$	Z_k	R_k	X_k
В	А	Вт	–	А	%	Вт	Ом	Ом	Ом

Задание 3. Провести испытание трансформатора при нагрузке

1. Установить потенциометром Ru1 на первичной обмотке трансформатора напряжение $U_1 = U_{1н} = 220$ В.
2. Записать показания приборов в табл.3.
3. Замкнуть кнопочный выключатель J1.
4. Перевести слайдер реостата Rн1 в положение 100 %. Записать показания приборов при этом значении реостата Rн1 в табл.3. Затем, изменяя положение слайдера реостата Rн1, поочередно записывать в табл.3 показания приборов при разных значениях сопротивления этого реостата. Последнее измерение показаний приборов выполнить при положении 0 % слайдера реостата Rн1.

5. Отключить кнопочный выключатель J1.

6. По показаниям приборов табл.3 рассчитать значения η , β , ΔP_m , ΔP и ΔU_2 трансформатора при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 1$. Полученные результаты записать в табл.3.

Таблица 3

Результаты испытания трансформатора при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 1$

Результаты измерений							Результаты вычислений				
U_1	I_1	P_1	$\cos\varphi_1$	U_2	I_2	P_2	η	β	ΔP_m	ΔP	ΔU_2
В	А	Вт	–	В	А	Вт	–	–	Вт	Вт	%
					0	0	0	0			0

7. По данным табл.3 построить рабочие характеристики трансформатора I_1 , U_2 , $\cos\varphi_1$, $\eta = f(P_2)$ при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 1$.

8. По данным табл.3 построить графики $\Delta P_{ст}$, ΔP_m , ΔP , $\eta = f(\beta)$.

9. Замкнуть кнопочный выключатель J2 и разомкнуть однополюсные выключатели пакетного выключателя J3.

10. Записать показания приборов в табл.4.

11. Замыкать поочередно однополюсные выключатели пакетного выключателя J3, изменяя тем самым сопротивление нагрузочного устройства с активно-индуктивным характером сопротивления. Полученные показания приборов записывать в табл.4.

12. Отключить кнопочный выключатель J2 и однополюсные выключатели пакетного выключателя J3.

13. По показаниям приборов в табл.4 рассчитать значения η , β , ΔP_m , ΔP и ΔU_2 трансформатора при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 0,8$ и $\varphi_2 > 0$. Полученные результаты записать в табл.4.

14. По данным табл.4 построить рабочие характеристики трансформатора I_1 , U_2 , $\cos\varphi_1$, $\eta = f(P_2)$ при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 0,8$ и $\varphi_2 > 0$.

Таблица 4

Результаты испытания трансформатора с $\cos\varphi_2 = 0,8$, $\varphi_2 > 0$

Результаты измерений							Результаты вычислений				
U_1	I_1	P_1	$\cos\varphi_1$	U_2	I_2	P_2	η	β	ΔP_m	ΔP	ΔU_2
В	А	Вт	–	В	А	Вт	–	–	Вт	Вт	%
					0	0	0	0			0

15. Замкнуть кнопочный выключатель J4 и разомкнуть однополюсные выключатели пакетного выключателя J5.

16. Записать показания приборов в табл.5.

17. Замыкать поочередно однополюсные выключатели пакетного выключателя J5, и, тем самым, изменять сопротивление нагрузочного устройства с активно-емкостным характером сопротивления. Полученные показания приборов записывать в табл.5.

Таблица 5

Результаты испытания трансформатора с $\cos\varphi_2 = 0,8$, $\varphi_2 < 0$

Результаты измерений							Результаты вычислений				
U_1	I_1	P_1	$\cos\varphi_1$	U_2	I_2	P_2	η	β	ΔP_m	ΔP	ΔU_2
В	А	Вт	–	В	А	Вт	–	–	Вт	Вт	%
					0	0	0	0			0

18. Отключить кнопочный выключатель J4 и однополюсные выключатели пакетного выключателя J5.

19. По показаниям приборов в табл.5 рассчитать значения η , β , ΔP_m , ΔP и ΔU_2 трансформатора при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 0,8$ и $\varphi_2 < 0$. Полученные результаты записать в табл.5.

20. По данным табл. 3 – 5 построить графики зависимостей $\Delta U_2 = f(\beta)$ при активном, активно-индуктивном и активно-емкостном характере сопротивления нагрузки трансформатора.

Содержание отчета

1. Титульный лист с указанием названия лабораторной работы, фамилии и номера группы студента, позиций для подписи преподавателя и даты выполнения лабораторной работы.
2. Паспортные данные исследуемого однофазного трансформатора.
3. Принципиальная электрическая схема лабораторного стенда для испытания однофазного трансформатора (и/или его модель).
4. Г-образная схема замещения однофазного трансформатора.

5. Формулы для расчета указанных в таблицах вычисляемых параметров однофазного трансформатора и его схемы замещения.

6. Таблицы с результатами измерения и расчета при проведении опытов холостого хода, короткого замыкания и испытания однофазного трансформатора с нагрузкой при активном, активно-индуктивном и активно-емкостном характере ее сопротивления.

7. Графики рабочих характеристик I_1 , U_2 , $\cos\varphi_1$, $\eta = f(P_2)$ трансформатора при нагрузке с $\cos\varphi_2 = 1$ и с $\cos\varphi_2 = 0,8$, $\varphi_2 > 0$.

8. Графики зависимостей $\Delta P_{ст}$, ΔP_m , ΔP , $\eta = f(\beta)$ при активном сопротивлении нагрузки трансформатора.

9. Графики зависимостей $\Delta U_2\% = f(\beta)$ при активном, активно-индуктивном и активно-емкостном характере сопротивления нагрузки трансформатора.

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4, заполняемых со стандартными полями на одной стороне. При предварительной подготовке к лабораторной работе в отчете, предъявляемом преподавателю перед ее выполнением, представляются незаполненные таблицы с названиями и заготовки графиков с их наименованиями.

Контрольные вопросы

1. Как устроен однофазный трансформатор и его принцип действия?
2. Какой режим работы трансформатора называется номинальным?
3. Что называется коэффициентом трансформации и как он определяется?
4. Какие существуют схемы замещения приведенного трансформатора?
5. Какой физический смысл сопротивлений R_x и X_x в схеме замещения трансформатора?
6. По результатам каких опытов можно определить параметры схемы замещения трансформатора?

7. Какие потери мощности трансформатора определяются из опыта холостого хода?
8. Какие потери мощности трансформатора определяются из опыта короткого замыкания?
9. Какие параметры трансформатора и его схемы замещения можно определить по результатам опыта холостого хода?
11. Какие параметры трансформатора и его схемы замещения можно определить по результатам опыта короткого замыкания?
12. От чего зависит коэффициент полезного действия трансформатора? При выполнении какого условия режиме его значение достигает максимума?
13. Почему потери мощности в магнитопроводе трансформатора не зависят от тока нагрузки?
14. Почему можно пренебречь потерями мощности в магнитопроводе в опыте короткого замыкания?
15. Как влияет на внешнюю характеристику трансформатора характер его нагрузки?

Основная литература

1. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника. СПб.: БХВ – Петербург, 2012. 592 с.
2. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК. СПб.: КОРОНА принт, 2007. 256 с.
3. Гольдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 512 с.
4. Немцов М.В. Электротехника. В 2 кн. Кн. 1. М.: Издательский центр «Академия», 2014. 240 с.

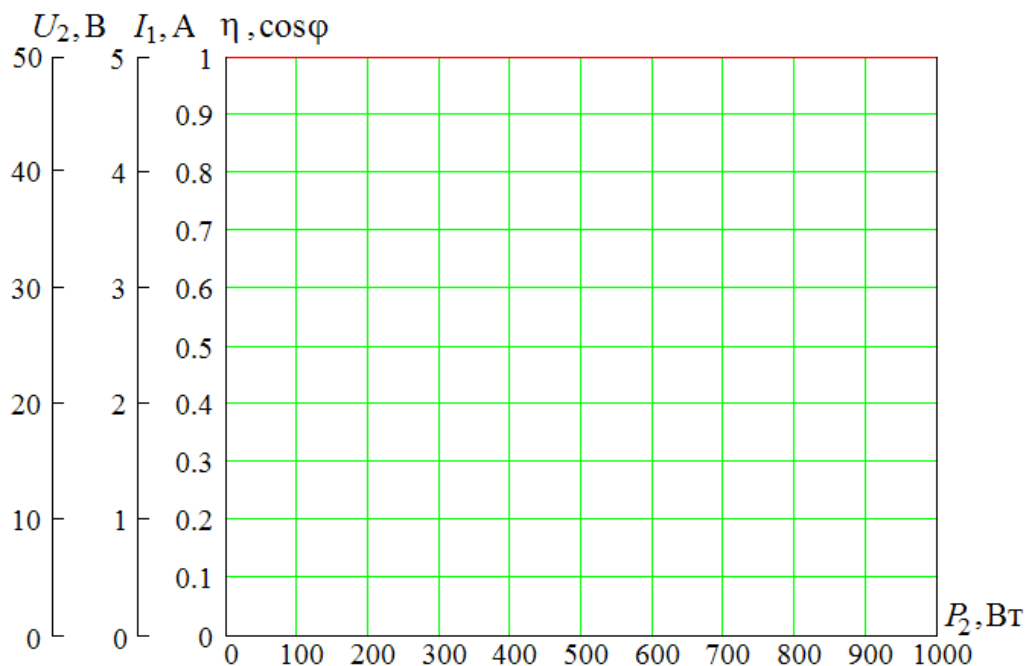
Дополнительная литература

1. Рекус Г.Г., Чесноков В.Н. Лабораторные работы по электротехнике и основам электроники: Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов. М.: Высш. школа, 1989. 240 с.

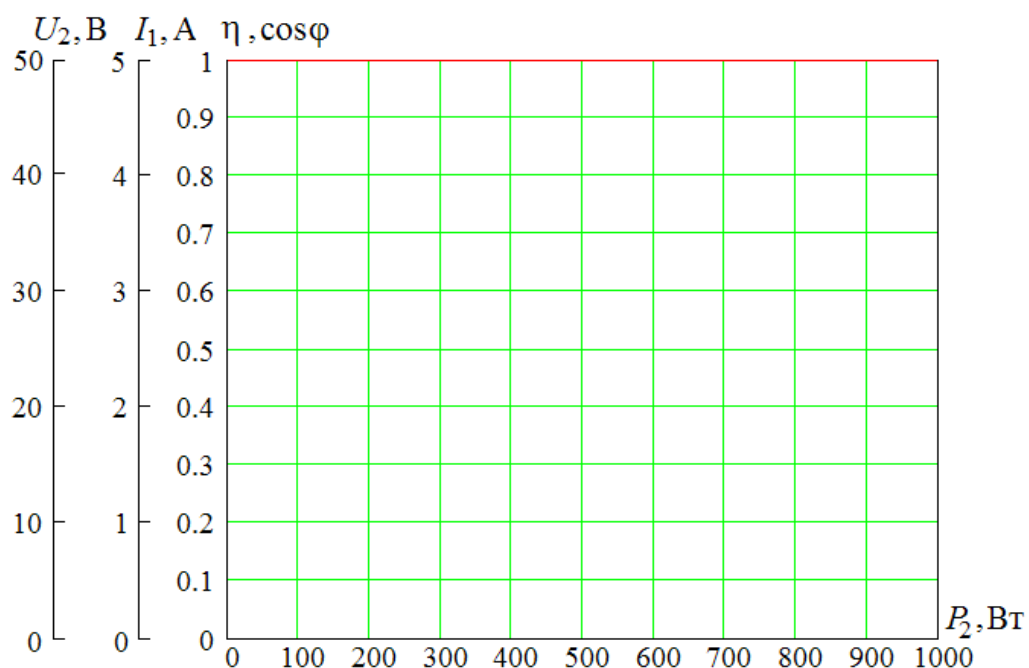
2. Стрелков Б.В., Шерстняков Ю.Г. Трансформаторы и асинхронные электрические двигатели. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 36 с.

Приложение 1. Заготовки для графического представления результатов экспериментального исследования характеристик однофазного трансформатора

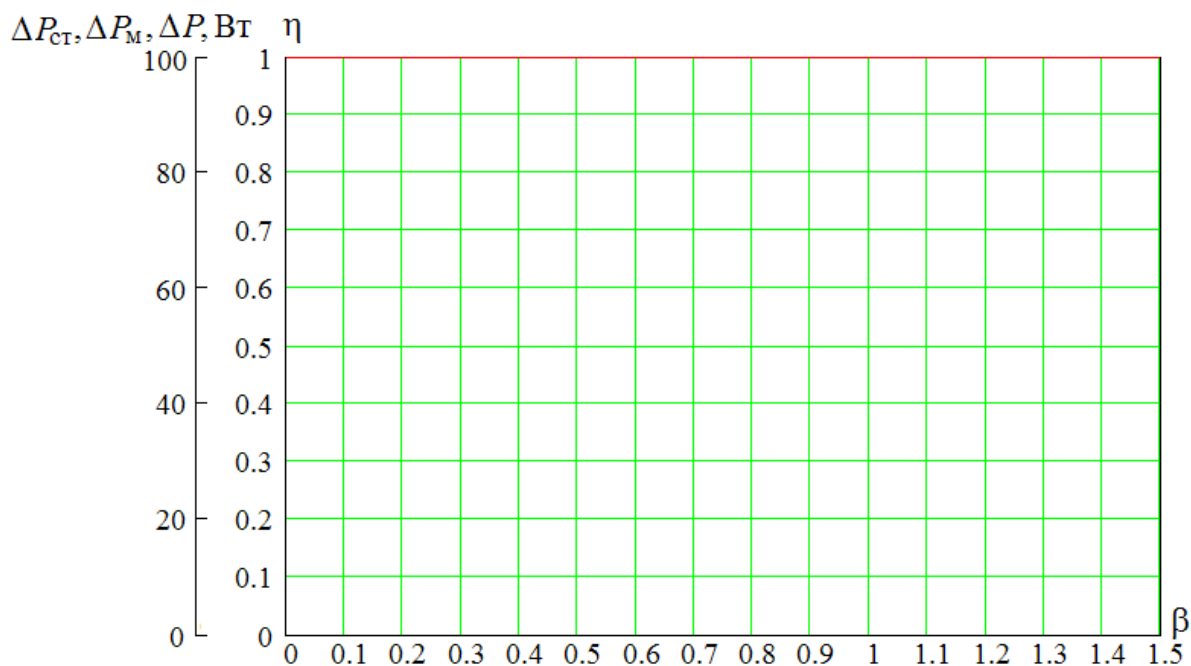
Рабочие характеристики I_1 , U_2 , $\cos\varphi_1$, $\eta = f(P_2)$
трансформатора ОСМ1-0,63-220/42 при $\cos\varphi_2 = 1$



Рабочие характеристики I_1 , U_2 , $\cos\varphi_1$, $\eta = f(P_2)$
трансформатора ОСМ1-0,63-220/42 при $\cos\varphi_2 = 0,8$, $\varphi_2 > 0$



Зависимости мощностей потерь $\Delta P_{ст}$, $\Delta P_{м}$, ΔP и КПД η трансформатора
ОСМ1-0,63-220/42 от коэффициента загрузки β



Зависимости относительного изменения напряжения ΔU_2 на вторичной
обмотке трансформатора ОСМ1-0,63-220/42 от коэффициента загрузки β

