

Федеральное Государственное Бюджетное
Образовательное Учреждение Высшего Образования
Мытищинский Филиал Московский Государственный Технический
Университет им. Н.Э. Баумана

Н. П. Полуэктов, И. И. Усатов

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Лабораторная работа № 18. Исследование трансформатора.

Учебно-методическое пособие

Москва

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана

2023

УДК 537.852

ББК. 22.3

Факультет «Космический»

Кафедра «Высшая математика и физика»

Рекомендовано Научно-методическим советом

МГТУ им. Н.Э.Баумана в качестве учебно-методического пособия

Авторы:

Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов

Рецензент

канд. физ.-мат. наук, доцент *О. В. Русаков*

Электромагнитная индукция и ее применение.: учебно-методическое пособие / Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов.- Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 19 с.: ил.

В работе рассмотрено применение явления электромагнитной индукции в устройстве преобразования напряжения – трансформаторе. Приведены законы и принципы работы трансформатора, описана лабораторная установка, изложена методика измерений внешних характеристик трансформатора при различных типах нагрузок.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для обеспечения лекционного курса, практических занятий и семинаров по физике. Данный материал входит в модуль «Электричество и электромагнетизм» в раздел лабораторные работы «Электромагнитная индукция и ее применение». Предназначено для студентов всех технических специальностей Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (уровень бакалавриата и специалитета), изучающих дисциплину «Физика».

УДК 537.852

ББК. 22.3

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. Теоретическая часть	6
Назначение, устройство и принцип действия трансформатора	6
2. Определение параметров трансформатора	10
2.1. Параметры трансформатора в режиме холостого хода (ХХ).	11
2.2. Параметры трансформатора в режиме короткого замыкания (КЗ).	12
2.3. Внешние характеристики трансформатора	12
3. Экспериментальная часть	14
3.1. Описание экспериментальной установки	14
3.2. Порядок выполнения работы	15
3.3. Режим холостого хода	15
3.4. Режим короткого замыкания	16
3.5. Режим работы под нагрузкой	17
4. Форма отчета о работе	18
5. Контрольные вопросы	18
Список литературы	18

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебно-методическое пособие посвящено экспериментальному исследованию работы однофазного трансформатора.

Целью данной лабораторной работы является изучение теоретических основ работы трансформатора, практическим навыкам работы и применения данного устройства.

Для выполнения лабораторной работы необходимо изучить следующий теоретический материал:

1. Характеристики электрического и магнитного полей.
2. Определение магнитного потока.
3. Закон электромагнитной индукции Фарадея.
4. Явления взаимной индукции.
5. Токи Фуко.
6. Формулы для активной и реактивных сопротивлений с учетом сдвига фаз между напряжением и током.
7. К.п.д. трансформатора.

Цель лабораторной работы:

1. Научить студента работе на экспериментальной установке.
2. Изучить особенности работы трансформатора.
3. Определить потери мощности в железном сердечнике в режиме холостого хода.
4. Определить потери мощности в проводах обмоток трансформатора в режиме короткого замыкания.
5. Определить внешние характеристики трансформатора при различных типах нагрузок.

Задачи лабораторной работы:

1. Создать у студентов навыки ведения лабораторного журнала, построения графиков, обработки экспериментальных результатов.

2. Научить составлять отчет по выполненной работе.
3. Закрепить теоретические знания по работе трансформатора.

Описание работы составлено так, чтобы ясное представление о существе изучаемых явлений и применяемом методе измерений могли себе составить как те студенты, которые уже прослушали этот материал на лекциях, так и те, которые только приступают к изучению соответствующего раздела физики. Учебный материал содержит необходимую информацию для организации самостоятельной работы студента при выполнении лабораторной работы.

Лабораторная работа

Однофазный трансформатор

Цель работы

Усвоить практические приёмы лабораторного исследования однофазного трансформатора методом холостого хода (опыт ХХ) и короткого замыкания (опыт КЗ), снять внешние характеристики трансформатора при различных типах нагрузок.

1. Теоретические сведения и расчётные формулы

Назначение, устройство и принцип действия трансформатора

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы находят широкое применение для передачи и распределения электрической энергии, для различных технологических целей и для питания различных цепей радио-, электронно-вычислительной и телевизионной аппаратуры, устройств связи, автоматики, телемеханики и т. д.

Принцип действия трансформаторов основан на явлении взаимной индукции, который является следствием закона электромагнитной индукции Фарадея:

$$e_i = -\frac{d\Phi_B}{dS}, \quad (1)$$

где e_i – ЭДС электромагнитной индукции, Φ_B – магнитный поток.

Потоком вектора магнитной индукции B (магнитным потоком) через малую площадку dS называется скалярная физическая величина, равная

$$d\Phi_B = B \cdot dS \cos \alpha = \vec{B} d\vec{S} \quad (2)$$

где α – угол между векторами \vec{B} и \vec{n} - нормалью к площадке dS .

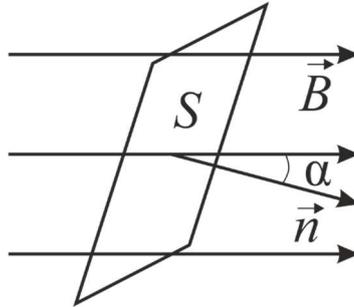


Рис.1. Поток вектора магнитной индукции B через малую площадку dS

Поток вектора магнитной индукции Φ_B через произвольную поверхность S равен сумме потоков через малые площадки, на которые разбивается большая площадь:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (3)$$

На рисунке 2 изображена электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора (а) и его условное графическое обозначение (б).

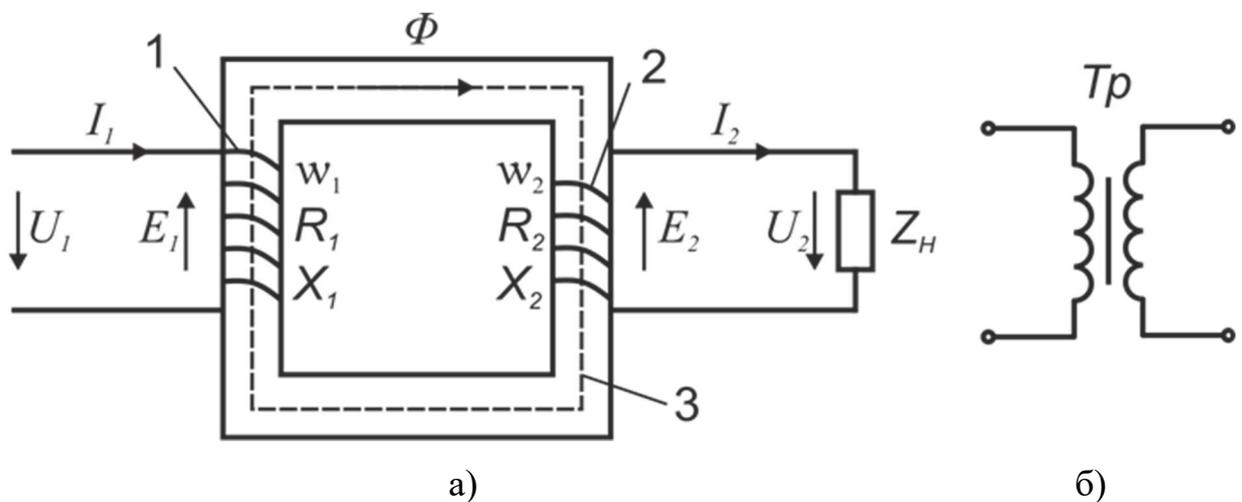


Рис.2. Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора (а) и его условное графическое обозначение (б)

Трансформатор состоит из двух обмоток, первичной 1 и вторичной 2, размещенных на замкнутом ферромагнитном магнитопроводе 3, который для уменьшения потерь от вихревых токов Фуко набран из листов электротехнической стали толщиной $(0,35 \pm 0,5)$ мм, легированной кремнием. Магнитопровод служит для усиления магнитной связи между обмотками трансформатора, т. е. для уменьшения потерь магнитного потока, создаваемого первичной обмоткой трансформатора. При подключении первичной обмотки А-Х трансформатора к сети первичный ток i_1 , проходя по её виткам w_1 , возбуждает в сердечнике синусоидальный магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота питающего напряжения U_1 (см. рис.1). Этот поток, пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, наводит в них электродвижущую силу (ЭДС):

$$e_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Где n_1 и n_2 число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно.

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют *коэффициентом трансформации* трансформатора:

$$k = \frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент трансформации трансформатора есть отношение ЭДС его обмоток или отношение чисел витков этих обмоток. В паспорте трансформатора обычно указывают отношение номинальных напряжений в режиме холостого хода U_{1x}/U_{2x} , которое практически равно отношению ЭДС, так как при разомкнутой вторичной обмотке напряжение,

приложенное к первичной обмотке, почти целиком уравнивается ее ЭДС ($U_{1x} \approx e_1$), а вторичное напряжение равно вторичной ЭДС ($U_{2x} \approx e_2$). Поэтому выражение для коэффициента трансформации можно переписать в виде:

$$k = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

Следовательно, коэффициент трансформации равен отношению напряжений на обмотках при холостом ходе трансформатора.

При работе трансформатора, в первичной обмотке электрическая энергия, потребляемая из сети, преобразуется в энергию магнитного поля, а во вторичной обмотке, наоборот, энергия магнитного поля преобразуется в электрическую, отдаваемую затем (в основном) потребителю (нагрузке). Небольшая часть мощности теряется в самом трансформаторе. При номинальном режиме мощность потерь в обмотках и магнитопроводе трансформатора невелика, поэтому трансформаторы обычно имеют высокий КПД, достигающий (98—99) %.

Таким образом, в трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же (из-за малых потерь на нагревание обмоток и магнитопровода трансформатора) практически остается постоянной, т. е. можно считать, что $I_1 U_1 \approx I_2 U_2$. Следовательно,

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{n_1}{n_2} = k \quad (6)$$

Итак, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям. Ток первичной обмотки трансформатора при отключенном потребителе электроэнергии (вторичная обмотка разомкнута) является током холостого хода. Электрическая схема обмотки трансформатора представляет собой последовательно включенные активное сопротивление R и индуктивное сопротивление X_L , т.е. сопротивление провода обмотки ее индуктивность. Ток, проходящий по обмотке, создает вокруг себя магнитное поле, которое пронизывая площадь витков обмотки, создает магнитный поток. Переменный

во времени ток создает переменный магнитный поток и согласно закону Фарадея, возникает ЭДС самоиндукции. Отличие от ЭДС индукции состоит в том, что в этом случае магнитный поток создается не внешним источником магнитного поля, а самим током. Тогда магнитный поток пропорционален току и равен:

$$\Phi_B = L \cdot I, \quad (7)$$

где L – называется индуктивностью. Возникающая ЭДС в обмотке равна:

$$e_c = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(L \cdot I)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}, \quad (8)$$

знак минус означает, что ЭДС самоиндукции препятствует изменению тока.

На рисунке 3 показан переменный ток, текущий через катушку индуктивностью L .



Рис.3. Электрическая цепь с идеальной индуктивностью. а) схема; б) векторная диаграмма тока и напряжения на катушке индуктивности

Если в цепи приложено переменное напряжение $U = U_0 \cos \omega t$, то в ней потечет переменный ток, в результате чего возникнет ЭДС самоиндукции. Тогда закон Ома для рассматриваемого участка цепи имеет вид. Так как внешнее напряжение приложено к катушке индуктивности, то

$$U = U_0 \cos \omega t = L \frac{dI}{dt} \text{ и } L dI = U_0 \cos \omega t \cdot dt, U_L \cos \omega t - L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (9)$$

После интегрирования, получим:

$$I = \frac{U_0}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_0}{\omega L} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (10)$$

Величина ωL имеет размерность Ом и называется реактивным индуктивным сопротивлением $X_L = \omega L$. Сравнение выражений (9) и (10)

приводит к выводу, что падение напряжения U_L опережает по фазе ток I , текущий через катушку, на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме (см. рис. 3, б).

В электротехнике синусоидальные величины заменяют комплексными числами, используя формулу Эйлера:

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi, \text{ где } j = \sqrt{-1} \quad (11)$$

Тогда индуктивное сопротивление с учетом угла поворота на 90° в комплексной форме записывается следующим образом:

$$\dot{X}_L = \omega L e^{j90^\circ} = \omega L (\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ) = j\omega L, \quad (12)$$

здесь точка над \dot{X}_L - означает, что это вектор, повернутый на 90° против часовой стрелки.

На рисунке 4 активное сопротивление R включено последовательно с индуктивностью L .

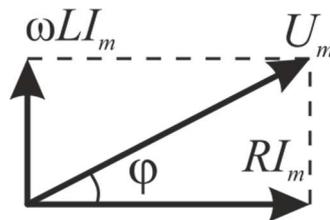


Рис.4. Векторная диаграмма напряжений на последовательно включенных сопротивлении R и индуктивности L

Второе правило Кирхгофа гласит: алгебраическая сумма падений напряжений в контуре равно алгебраической сумме ЭДС. Тогда значение напряжения, подводимого к трансформатору в режиме холостого хода, в соответствии со вторым правилом Кирхгофа для первичной обмотки, может быть представлено как сумма векторов:

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_1 + R_1 \vec{I}_0 + jX_1 \vec{I}_0, \quad (13)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; X_1 – индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоками рассеяния; $jX_1 =$

$j\omega L$ – комплексное сопротивление индуктивности L , которое учитывает тот факт, что напряжение на индуктивности опережает ток на 90° . Тогда полное сопротивление последовательно включенных R и L равно: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, как показано на рис.4.

2. Определение параметров трансформатора

Для определения коэффициента трансформации k , а также параметров схемы замещения (рис. 5) и потерь мощности в трансформаторе проводят опыты холостого хода (опыт ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

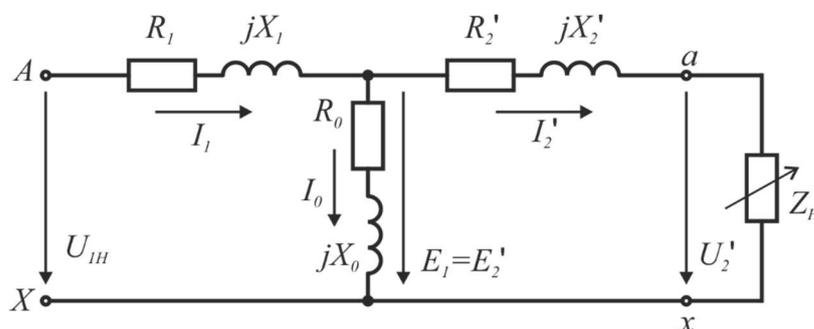


Рис.5. Схема замещения трансформатора

На рисунке 5 обозначено:

- R_1 и X_1 – активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки;
- $R_2' = n^2 R_2$ и $X_2' = n^2 X_2$ – приведенные к числу витков первичной обмотки активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки;
- R_0 – активное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное потерями мощности в стальном магнитопроводе;
- X_0 – индуктивное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное основным магнитным потоком;
- $Z_н' = n^2 Z_н$ – приведенное к числу витков первичной обмотки сопротивление нагрузки;

• $U'_2 = nU_2$ и $I'_2 = I_2/n$ – приведенные к числу витков первичной обмотки вторичное напряжение и вторичный ток.

2.1. Параметры трансформатора в режиме холостого хода (XX)

Опыт холостого хода трансформатора проводится с целью определения коэффициента трансформации k , магнитного потока Φ_m , а также потерь мощности P_m в сердечнике магнитопровода при номинальном режиме. На рисунке 6 показана схема первичной обмотки трансформатора и векторная диаграмма напряжений на ней в режиме XX.

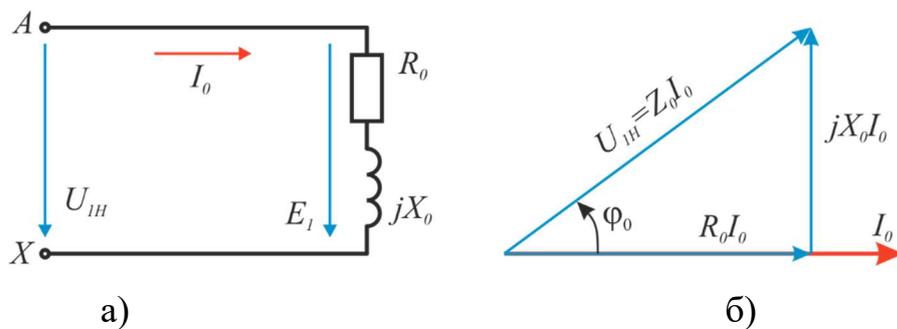


Рис.6. Схема первичной обмотки трансформатора (а) и векторная диаграмма напряжений на ней в режиме XX (б)

В опыте XX к первичной обмотке трансформатора подводится номинальное напряжение (рис.5)

$$\vec{U}_{1H} = -\vec{E}_1 + \vec{Z}_1 \vec{I}_0, \quad (14)$$

где $\vec{Z}_1 = R_1 + jX_1$ – полное сопротивление первичной обмотки.

При этом вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$) и напряжение на её зажимах $U_2 = U_{20} = E_2$.

Измерив напряжение U_{20} , ток I_0 и активную мощность $P_x = I_0^2 R_1$ и пренебрегая падением напряжения на первичной обмотке $Z_1 I_0$ (ввиду его небольшого значения по сравнению с ЭДС E_1), т. е. пользуясь упрощённой схемой замещения трансформатора при XX (рис.3, а и б), определяют:

– коэффициент трансформации:

$$k = E_1 / E_2 \approx U_{1н} / U_{20} \quad (15)$$

– параметры намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора

$$Z_0 = U_{1н} / I_0; R_0 = P_x / I_0^2; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad (16)$$

– потери мощности при ХХ, называемые *потерями в стали* P_0 , которые затрачиваются в основном на нагрев магнитопровода от действия вихревых токов и циклического перемагничивания стали, т. е. $P_0 \approx P_x$.

2.2. Параметры трансформатора в режиме короткого замыкания (КЗ)

На рисунке 7 представлена схема первичной обмотки трансформатора и векторная диаграмма напряжений на ней в режиме КЗ.

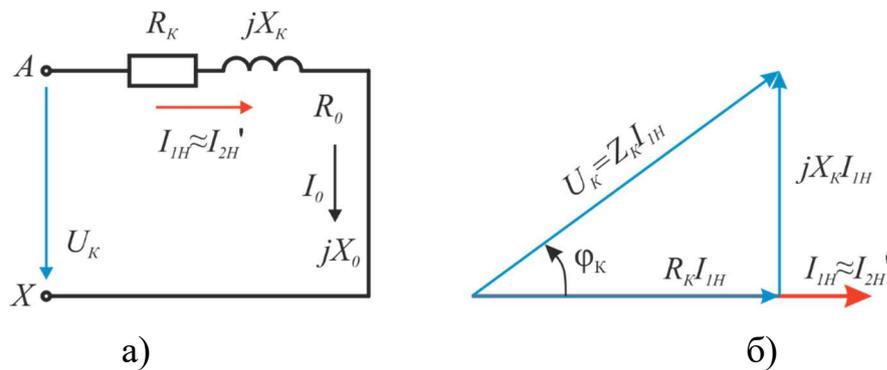


Рис.7. Схема первичной обмотки трансформатора (а) и векторная диаграмма напряжений на ней в режиме КЗ (б)

В опыте КЗ (рис.7а) в отличие от опасного аварийного короткого замыкания трансформатора, возникающего случайно при работе при напряжении $U_1 = U_{1н}$, к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение $U_1 = U_k$, при котором в его обмотках устанавливаются токи, равные соответствующим номинальным значениям:

$$I_{1н} = S_n / U_{1н}; I_{2н} = S_n / U_{2н} \approx n I_{1н} \quad (17)$$

Измерив напряжение U_k , ток $I_{1н}$ и активную мощность P_k , определяют:

– параметры схемы замещения при КЗ трансформатора (пользуясь упрощенной схемой замещения, рис. 6, а):

$$Z_K = U_K / I_{1H}; R_K = P_K / I_{1H}^2; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad (18)$$

где $Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$, $R_K = R_1 + R_2'$ и $X_K = X_1 + X_2'$ – соответственно полное, активное и реактивное сопротивления КЗ трансформатора;

– напряжение КЗ (рис. 7, б), выраженное в процентах,

$$u_K(\%) = 100U_K / U_{1H},$$

– потери мощности при КЗ трансформатора (*потери в меди*)

$$P_M \approx P_K.$$

2.3. Внешние характеристики трансформатора

Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки при изменяемой нагрузке от тока нагрузки, т. е. $U_2 = f(I_2)$, носит название *внешней характеристики* трансформатора.

Вторичное напряжение (см. рис. 2), равное

$$\begin{aligned} Z_K = U_K / I_{1H}; R_K = P_K / I_{1H}^2; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \\ \vec{U}_2 = \vec{E}_2 - \vec{Z}_2 \vec{I}_2 = E_2 - (R_2 + jX_2) \vec{I}_2 \approx \vec{U}_{20} - \vec{Z}_2 \vec{I}_2 \end{aligned} \quad (19)$$

при увеличении тока нагрузки уменьшается как за счет увеличения падения напряжения $Z_2 I_2$ на его вторичной обмотке, так и за счёт уменьшения ЭДС E_2 (вследствие некоторого уменьшения магнитного потока Φ при соответствующем увеличении тока I_1). Однако при активно-ёмкостной нагрузке при увеличении тока напряжение U_2 увеличивается.

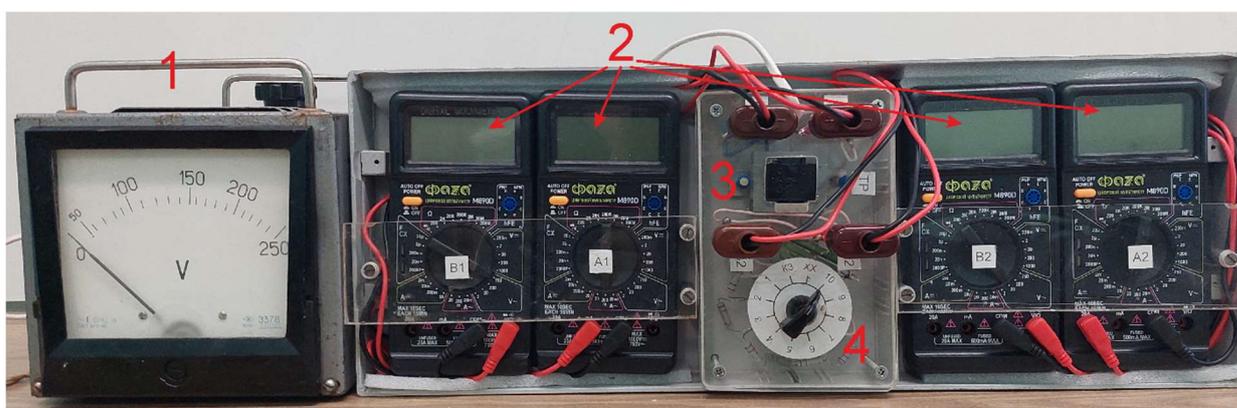
Внешние характеристики могут быть построены путём прямого измерения напряжения U_2 и тока I_2 при изменении нагрузки Z_n .

3. Экспериментальная часть

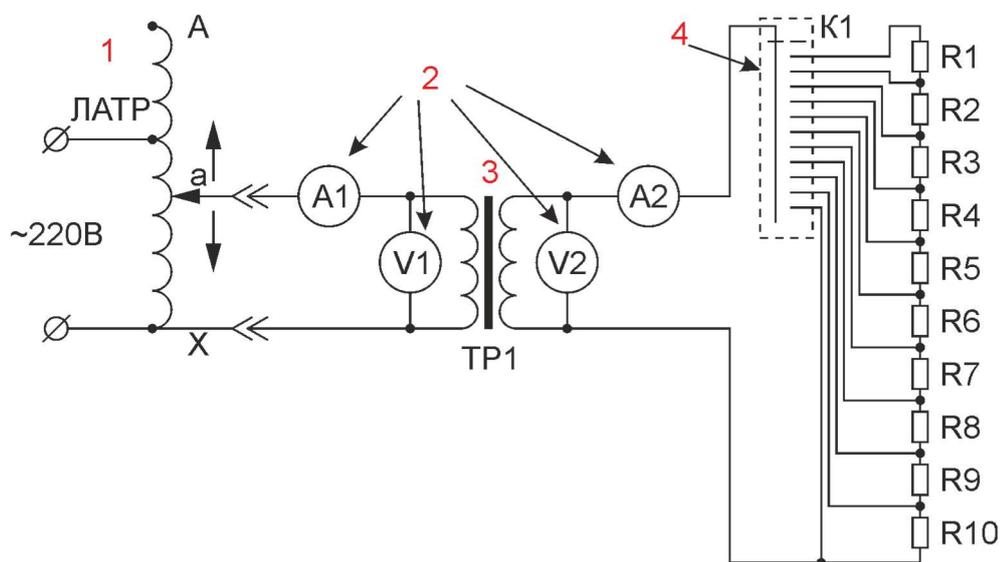
Цель работы: изучить устройство, принцип работы, назначение однофазного трансформатора; установить зависимость между напряжениями и токами в первичной и вторичной обмотках трансформатора; определить коэффициент трансформации однофазного трансформатора.

3.1. Описание установки.

На рисунке 8 приведены фотография установки и её схема.



а)



б)

Рис.8. Лабораторная установка: а) – общий вид; б) – электрическая схема

Установка состоит из лабораторного автотрансформатора регулируемого (ЛАТР) 1, мультиметров 2, для измерения напряжений и токов на первичной и вторичной обмотках трансформатора 3 и переключателя режима работы трансформатора 4.

В лабораторной предусмотрено три режима работы трансформатора.

1. Режим холостого хода (положение переключателя ХХ).
2. Режим короткого замыкания. (положение переключателя КЗ).
3. Режим работы под нагрузкой (положения переключателя 1-10).

В качестве исследуемого трансформатора используется ТП-112-4 его основные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Номинальное напряжение в первичной обмотке (U_{H1}), В	220±22
Частота переменного тока, Гц	50±0,5
Мощность номинальная, Вт	7,2
Ток первичной обмотки в режиме холостого хода (I_{H1}) А, не более	0,03
Напряжение вторичных обмоток в режиме номинальной нагрузки при номинальном напряжении сети, В	7,1±0,4
Ток номинальной нагрузок, А	0,39
Активное сопротивление первичной обмотки (R_1), Ом	540
Активное сопротивление вторичной обмотки (R_2), Ом	3,19

3.2. Порядок выполнения работы

Перед началом работы, в присутствии преподавателя, убедитесь в правильности сборки и подключения установки.

Переключатель режима работы трансформатора перевести в режим холостого хода (ХХ).

Установить на ЛАТРе минимальное выходное напряжение. Для этого необходимо ручку ЛАТРа повернуть до против часовой стрелки до упора.

Включить установку в сеть.

Включить мультиметры.

Внимание перед любыми изменениями положения переключателя режима работы трансформатора, а также перед завершением работы, необходимо устанавливать на ЛАТРе минимальное выходное напряжение.

3.3. Режим холостого хода

Вращая ручку ЛАТРа добейтесь на первичной обмотке трансформатора номинального напряжения (см. таблицу 1). Значение напряжения фиксируются по показаниям мультиметра В1.

В таблицу 2 занесите значения напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформатора (U_1 и U_2), а также ток протекающий по первичной обмотке I_1 мА.

Таблица 2

$U_1, В$	$I_1, мА$	$I_1, А$	$U_2, В$	$P_{XX}, Вт$	$i_0, \%$	k	$\cos \varphi$

Произведите заполнение оставшихся ячеек таблицы.

1. Вычислите коэффициент усиления по току в процентах по отношению к номинальному току трансформатора:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} 100\% \quad (20)$$

2. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (21)$$

3. Мощность холостого хода P_0 , равная мощности тепловых потерь в сердечнике из-за гистерезиса и вихревых токов P_{cm} .

$$P_0 = I_0^2 R_1 = P_{cm} \quad (22)$$

4. Коэффициент мощности трансформатора

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{U_{1H} I_0} \quad (23)$$

3.4. Режим короткого замыкания.

Переведите переключатель режима работы трансформатора в положение КЗ.

Плавно вращая ручку ЛАТРа, добейтесь протекания по первичной обмотке трансформатора тока, равного $I_{H1} = 30$ мА. Значение тока определяется по мультиметру A_1 .

Занесите в таблицу 3 значения напряжения и тока первичной обмотки, а также ток, протекающий по вторичной обмотке.

Таблица 3

$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$P_{K3}, \text{Вт}$	$U_{K3}\%, \%$

Вычислите мощность трансформатора в режиме КЗ P_{K3} , которая равна мощности, идущих на нагрев медных обмоток P_m :

$$P_{K3} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = P_m \quad (24)$$

Вычислите напряжение короткого замыкания в % по отношению к номинальному напряжению первичной обмотки трансформатора.

$$U_{K3} \% = \frac{U_1}{U_{H1}} \cdot 100 \quad (25)$$

3.5. Режим работы под нагрузкой

Переведите переключатель режима работы трансформатора в положение 1.

Вращая ручку ЛАТРа добейтесь на первичной обмотке трансформатора номинального напряжения. Значение напряжения фиксируются по показаниям мультиметра В1.

Занесите показания мультиметров в соответствующие ячейки таблицы 4.

Таблица 4

N	$U_1,$ В	$I_1,$ мА	I_1, A	$U_2,$ В	I_2, A	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$\eta_1, \%$	$\eta_2, \%$	$\cos \varphi_2$
1.										
2.										
3.										
4.										
5.										
6.										
7.										
8.										
9.										
10.										

Повторить эксперимент изменяя нагрузку (режимы работы $N = 2-10$).

Заполните оставшиеся ячейки таблицы 4.

Постройте графики зависимости КПД трансформатора от активной мощности вторичной обмотки ($\eta(P_2)$) и внешнюю характеристику трансформатора ($U_2(I_2)$). КПД трансформатора вычисляется по следующей формуле:

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \quad (26)$$

Полученный к.п.д. сравнить величиной, вычисленной по формуле, учитывающей мощности потерь в сердечнике P_{cm} и проводах обмоток $P_m = P_{K3}$.

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_2 U_2 + P_{cm} + P_m} \quad (27)$$

4. Форма отчета о работе

Отчет по выполненной лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Титульный лист лабораторной работы согласно образцу.
2. Конспект теоретической части работы.
3. Методику эксперимента и краткое описание лабораторной установки.
4. Заполненные таблицы с экспериментальными данными.
5. Обработку экспериментальных данных согласно методическим указаниям в данной работе. В случае обработки данных эксперимента в *Excel* – распечатку скриншота и файл с результатами обработки.
6. Выводы по выполненной работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Как формулируется закон Фарадея? Приведите формулу магнитного потока через малую площадку и большую площадь.
2. Что такое токи Фуко и какие применяются способы их уменьшения в трансформаторах?
3. Приведите определение индуктивности и ее формула для катушки.
4. Напишите формулу индуктивного сопротивления.
5. Какой сдвиг фаз между током и напряжением на индуктивности?

6. Как определить потери мощности в стальном сердечнике трансформатора?
7. Как определить потери мощности в обмотках?
8. Что такое коэффициент трансформации трансформатора?
9. Что такое гистерезис ферромагнетика?

Литература

Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк. 2015. - 608с.: ил.

Касаткин А.С., Немцов М.В. Курс электротехники. М. ФГУП Издательство «Высшая школа» 2005..- 531 с.: ил.

Попов В.С., Мансуров Н.Н., Николаев С.А. Электротехника. Л. Изд. «Энергия» 1964.- 500 с.: ил.

Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд. испр. – М.: Высш. шк. 2015. - 542 с.: ил.