

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электромеханика
(направленность (профиль))

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Разработка лабораторного стенда «Исследование трехфазного трансформатора»

Студент(ка)

А.В. Болдырев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.П. Петунин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

« ____ » _____ 2016 г.

Тольятти 2016

Аннотация

В данной бакалаврской работе разработан лабораторный стенд по исследованию трехфазного трансформатора. В пояснительной записке к бакалаврской работе представлен расчёт характеристик трехфазного трансформатора лабораторного стенда. Расчет характеристик выполнен вручную. В расчете характеристик, приведены результаты по опыту короткого замыкания и холостого хода. Опыт холостого хода выполнялся с использованием схемы соединения Y/Δ . Опыт короткого замыкания выполнялся методом закорачивания первичной обмотки. На основе результатов по опыту короткого замыкания и холостого хода приведены графики их характеристик. Опыт по намагничиванию сердечника выполнялся по схемам соединения Y/Y и Y/Δ . Результаты по опыту намагничивания сердечника включают в себя осциллограммы первичных и вторичных токов и напряжений.

В теоретической части пояснительной записки рассмотрены методы исследования трехфазных трансформаторов, схемы опытов и обработка экспериментальных данных и методика проведения лабораторных работ на лабораторном стенде. В разделе описание лабораторного стенда, рассмотрено строение и характеристики лабораторного стенда, приведены электрические схемы блоков нагрузки и обмоток ВН и НН. В разделе «Правила эксплуатации лабораторного стенда» рассмотрена техника по безопасности при проведении лабораторных работ. В экономическом разделе рассчитана себестоимость модернизации лабораторного стенда с использованием нового оборудования. В технологической части представлена конструкция лабораторного стенда, трёхфазного трансформатора, а так же схемы соединения по опытам короткого замыкания, холостого хода, намагничивания сердечника, определение группы соединения. Графики характеристик и осциллограмма третьей гармоники трансформатора представлена на плакате формата А1.

Пояснительная записка содержит 56 листов 37 рисунков. Графическая часть работы представлена 6 чертежами формата А1

Содержание

Введение	4
1. Описание методов исследования трехфазных трансформаторов	5
1.1 Обзор существующих способов исследования трёхфазных трансформаторов	5
1.2 Описание лабораторного стенда	9
1.3 Схемы опытов и обработка экспериментальных данных	12
1.4 Методические пособия по лабораторным работам	20
2. Исследование характеристик испытуемого трансформатора	38
2.1 Исследование трансформатора лабораторного стенда в режиме холостого хода	38
2.2 Исследование трансформатора лабораторного стенда в режиме короткого замыкания	40
2.3 Исследование намагничивания сердечника трансформатора лабораторного стенда	44
3 Правила эксплуатации лабораторного стенда	50
4 Подбор комплектующих изделий стенда	51
Заключение	54
Список использованных источников	55

Введение

В настоящее время трёхфазные трансформаторы широко используются в электросетях и как, источники питания разных приборов. В процессе обучения студентов специальности «Электротехника» в различных учебных заведениях предусматриваются практические занятия на лабораторных стендах. Практические работы на учебных стендах способствуют углублению и закреплению знания теоретического материала, а так же достижения глубокого понимания в различных процессах трансформаторов.

Целью данной бакалаврской работы является разработка лабораторного стенда по исследованию трёхфазных трансформаторов, для практических занятий студентов. Новизна данной работы заключается в том, что модернизируется старый лабораторный стенд путем внедрения в него нового оборудования. Модернизация лабораторного стенда, намного дешевле, покупка нового стенда, поэтому работа является актуальной на сегодняшний день.

На проектируемом лабораторном стенде студенты должны выполнять данные лабораторные работы:

1. Исследование трехфазного трансформатора по методу холостого хода и короткого замыкания;
2. Исследования намагничивания сердечника трансформатора;
3. Исследование групп соединений трехфазного трансформатора и параллельной работы трансформаторов.

В результате проведения работ студенты должны усваивать устройство учебного стенда и способы управления им, а так же усвоение методик экспериментальных работ.

Предлагаемые лабораторно-практические работы являются двух-часовыми и рассчитаны на выполнение подгруппой из 2-3 студентов в специально оборудованной лаборатории.

1 Описание методов исследования трехфазных трансформаторов

1.1 Обзор существующих способов исследования трёхфазных трансформаторов

Экспериментальные исследования методом холостого хода трехфазного трансформатора

Исследование трехфазного трансформатора в режиме холостого хода – это одно из самых важных исследований для трансформаторов. Исследование трансформатора по методу холостого хода это метод исследования, когда первичная обмотка запитывается от сети с переменным напряжением, а вторичная обмотка разомкнута. Величина тока, при разомкнутой вторичной обмотке, во много раз меньше, чем при работе в обычном режиме. В трансформаторах с большой мощностью, ток холостого хода равен 5 – 10% от величины тока при работе трансформатора в обычном режиме. В маломощных трансформаторах эта величина достигает 30% от значения тока при работе в номинальном режиме.[1]

При эксплуатации трансформатора в режиме холостого хода создается магнитный поток в магнитопроводе. Вследствие потребления трансформатором реактивной мощности из сети питания, возбуждается магнитный поток. При работе трансформатора в режиме холостого хода, трансформатор потребляет активную мощность, которую он расходует для покрытия потерь в магнитопроводе. Потери в магнитопроводе, происходят вследствие появления вихревых токов и гистерезиса. Реактивная мощность, при работе трансформатора в режиме холостого хода, намного выше значения активной мощности. Размер значения коэффициента мощности у трансформатора в данном режиме работы, небольшой и равняется $\cos\mu = 0.2-0.3$.[9]

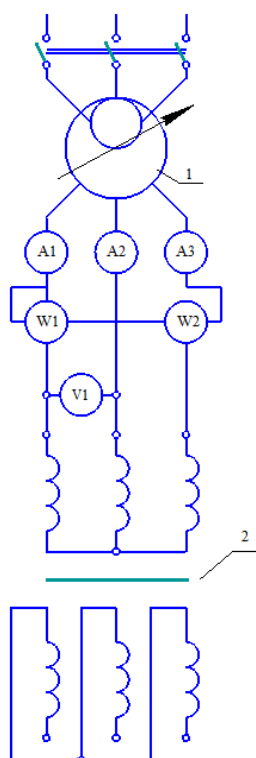


Рисунок 1.1- Схема опыта работы трансформатора в режиме холостого хода

На рисунке 1.1 рассматривается работа устройства в режиме холостого хода. В схеме подключены 3 амперметра, которые показывают значения линейных токов соответствующих фаз при работе трансформатора в режиме холостого хода. На рисунке 1.1, под цифрой 1 обозначен индукционный регулятор, а под цифрой 2 трехфазный трансформатор.

По результатам эксперимента работы трансформатора в режиме холостого хода, находим силу тока в первичной обмотке I_0 , потери стали в магнитопроводе $P_{ст}$, а так же коэффициент трансформации K . Амперметр подключенный к цепи первичной обмотки измеряет силу тока холостого хода I_0 . Потери стали в магнитопроводе устройства, смотрят по значению показания ваттметра, который подключен к цепи первой обмотки. Коэффициент трансформации вычисляется методом отношения значений двух вольтметров, которые подключены к цепи первичной и вторичной обмотки.

Экспериментальные исследования способом короткого замыкания трехфазного трансформатора.

Экспериментальная работа в режиме короткого замыкания состоит в том что, вторичная обмотка трансформатора накоротко замыкается. Следовательно, величина напряжения на второй обмотке устройства равно нулю. Величина напряжения в первичной обмотке трансформатора должно быть таким, чтобы токи были равны номинальным значениям тока обмоток данного трансформатора. Такое низкое напряжение называют напряжением короткого замыкания, оно равняется 5.5% от рабочего напряжения трансформатора.[2]

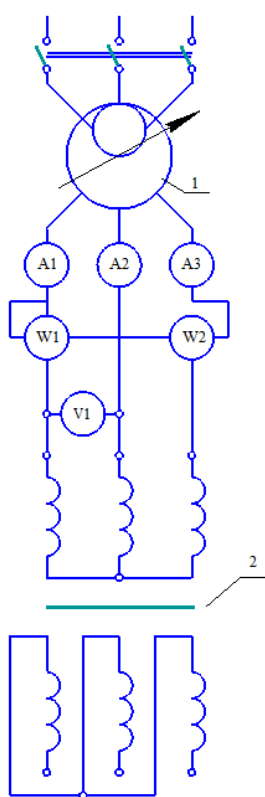


Рисунок 1.2 - Схема опыта работы устройства в режиме короткого замыкания

На рисунке 1.2 показана схема работы устройства в режиме короткого замыкания. Под цифрой 1 на рисунке указан индукционный регулятор, а под цифрой 2 – трехфазный трансформатор. Так же на рисунке 2 указано 3 амперметра, они показывают величину линейного тока каждой из фаз. A_u – показывает значение линейного тока вторичной обмотки. V – вольтметр,

показывает значение напряжения трансформатора при работе в режиме короткого замыкания. W_2 – ваттметр, показывает значение активной мощности в режиме короткого замыкания. По результатам эксперимента в режиме коротко замкнутой обмотки, находим значение напряжения короткого замыкания $u_k\%$ и его активные, реактивные составляющие ($u_a\%$ и $u_x\%$), а также потери обмоток трансформатора на нагревание $P_{обм}$, при рабочей нагрузке.

Экспериментальная работа по исследованию намагничивания сердечника трехфазного трансформатора

Рассмотрим явления, которые происходят при намагничивании магнитопровода трансформатора. Для этого на первичную обмотку трансформатора подается переменное напряжение, а вторичная обмотка размыкается.[4]

В трансформаторе с соединением обмоток звезда-звезда, гармоники кратные трем не могут быть в намагничивающих токах обмоток трансформатора. Но при этом, магнитные потоки фаз помимо основной гармоники, содержат третьи гармоники. Но так же, магнитные потоки фаз вместе с основной гармоникой Φ_1 включают в себя третьи гармоники Φ_3 . Значит особенной спецификой соединения звезда-звезда это содержание третьих гармоник потока Φ_3 . При этом третьи гармоники совпадают по фазам. Вследствие этого ЭДС и напряжение несинусоидальны и включают в себя третьи гармоники ЭДС.

В стержнях трехфазных трансформаторов потоки имеют одинаковое направление, поэтому потоки не могут иметь замкнутые пути. Вследствие этого потоки Φ_3 замыкаются через трансформаторное масло от одного ярма к другому, а также через крепежные детали. Благодаря этому потоки Φ_3 уменьшаются.

В данной работе трансформатор исследуется в режиме холостого хода. В результате исследования, записываются величины токов и напряжений и зарисовываются формы фазных и линейных напряжений и токов. Величины

высших гармоник и фазных ЭДС сравниваются при разных схемах соединения обмоток.

1.2 Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд по исследованию трехфазных трансформаторов предназначен для проведения лабораторно-практических занятий в высших, средних и начальных профессиональных образовательных учреждениях.



Рисунок 1.3 – Внешний вид лабораторного стенда

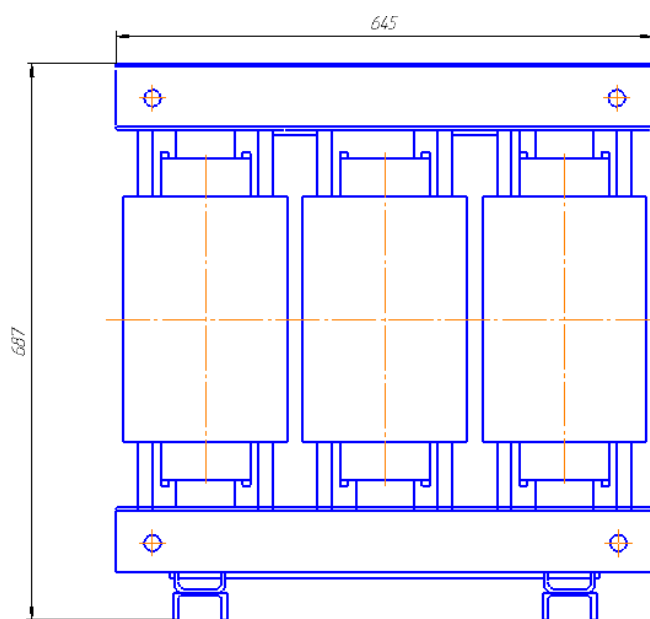


Рисунок 1.4 – Схема трехфазного трансформатора лабораторного стенда

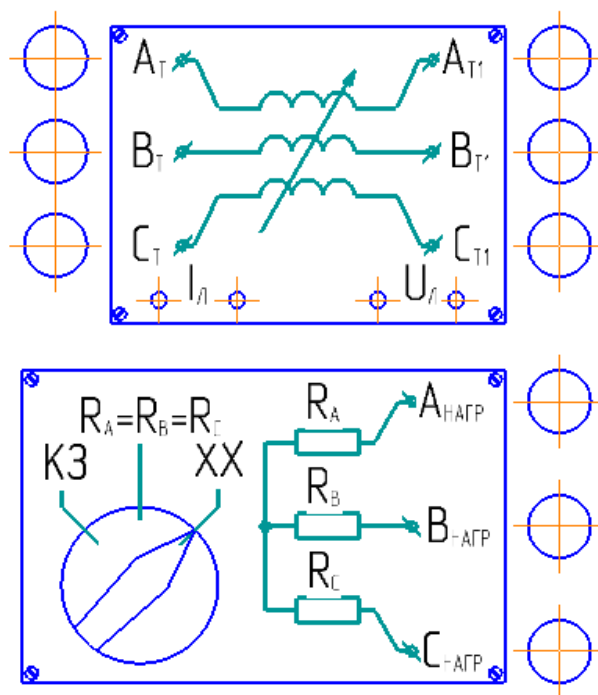


Рисунок 1.5–Схема блока нагрузки лабораторного стенда

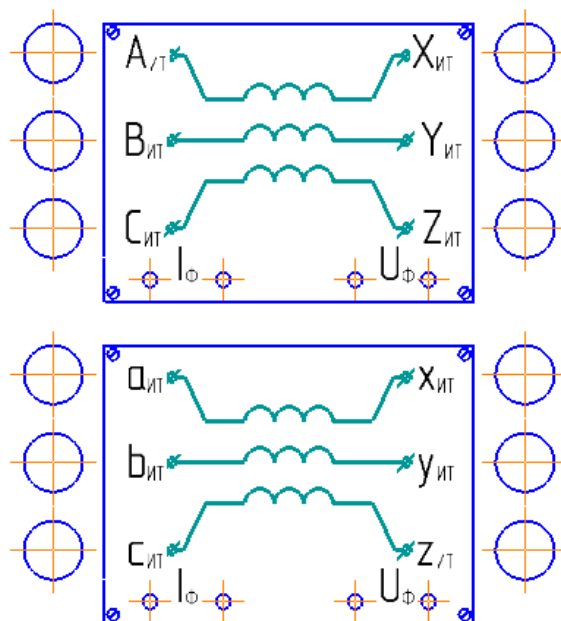


Рисунок 1.6 - Схема блока подключения обмоток ВН и НН трансформатора в лабораторном стенде

Внешний вид передней панели лабораторного стенда показан на рисунке 1.3. На левой стороне стенда расположен автомат и выводы для подключения

трехфазного питания А В С. Правее автомата расположены блок нагрузки и выводы автотрансформатора $A_T, B_T, C_T, A_{TI}, B_{TI}, C_{TI}$, который служит в роли регулятора напряжения (рисунок 1.5). Ниже регулятора напряжения находится переключатель режимов работы лабораторного стенда: холостой ход и работа под нагрузкой (рисунок 1.5). В переднюю панель стенда вмонтированы амперметр и вольтметр, которые подключаются к схемам с помощью переключек. С правой стороны расположены выводы первичной обмотки ($a_{ИТ}, b_{ИТ}, c_{ИТ}, x_{ИТ}, u_{ИТ}, z_{ИТ}$) и вторичной обмотки трансформатора ($A_{ИТ}, B_{ИТ}, C_{ИТ}, X_{ИТ}, Y_{ИТ}, Z_{ИТ}$) (рисунок 1.6). В качестве переключек используются соединительные провода. На передней панели между выводами расположены электрические схемы соединения обмоток трансформатора. Для измерения тока, мощности и напряжения каждой фазы, предусмотрен измерительный прибор К-505. Данный измерительный прибор не установлен в переднюю панель стенда и располагается на столе стенда, и подключается с помощью переключек.

Технические характеристики:

Потребляемая мощность 500 В·А

Электропитание:

- от трехфазной сети переменного тока с рабочим нулевым и защитным проводниками напряжением - 220 В;
- частота – 50 Гц.

Габаритные размеры:

- длина (по фронту) – 1800 мм ;
- ширина (ортогонально фронту) – 850 мм;
- высота – 1600 мм.

Масса – 210 кг

Количество человек, которое одновременно и активно может работать на комплекте – 3 чел.

Комплектность:

Трехфазный источник питания – 1 ед;

Трехполюсный выключатель – 1 ед;

Активная нагрузка – 1 ед;

Регулируемый автотрансформатор – 1 ед;

Коннектор – 1 ед;

Трехфазная трансформаторная группа ТС – 1,0/0,38 – 1 ед;

Блок измерительных приборов (К505) - 1 ед;

Руководство по выполнению базовых экспериментов «Трехфазные трансформаторы» – 3 ед.

Осциллограф – 1 ед.

Амперметр – 1 ед.

Вольтметр – 2 ед.

Лабораторные работы:

1. Исследование трехфазного трансформатора по методу холостого хода и короткого замыкания;
2. Исследования намагничивания сердечника трансформатора;
3. Исследование групп соединений трехфазного трансформатора и параллельной работы трансформаторов.

1.3 Схемы опытов и обработка экспериментальных данных

Опыт холостого хода.

В данном опыте исследуется повышающий трехфазный двухобмоточный трансформатор. Работа выполняется на лабораторном стенде. Схема опыта приведена на рисунке 1.7. Питание подается на обмотку НН трансформатора от сети после включения автомата А. В качестве регулятора РН напряжения используется автотрансформатор, который расположен под столом стенда. Для измерения в цепи питания предусмотрен измерительный прибор К-505, позволяющий выполнять измерения в трех фазах.

Для начала опыта переключатель «Пн» ставится в положение ХХ, остальные элементы в данном опыте не используются. Чтобы провести опыт, к обмотке НН подводят регулируемое, с помощью регулятора, напряжение в

пределах 0,3 до 1,1 от номинального напряжения, в то время как вторичная обмотка разомкнута. Обмотки соединяются по схеме Y/Y. Измеряется первичное напряжение U_{10} , ток I_0 , мощность P_0 , а так же вторичное напряжение U_{20} . Измерения проводятся в трех фазах, так как ток холостого хода насыщенного стержневого трансформатора несимметричен и не синусоидален. Показания приборов записываются в таблицу 1. Следует сделать не меньше 6 замеров.

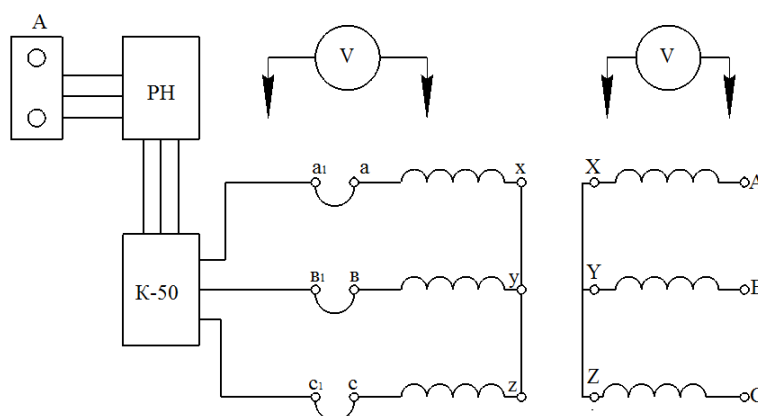


Рисунок 1.7– Схема опыта холостого хода

Таблица 1.1 – Результаты измерений по опыту короткого замыкания

№	Измерения											
	$U_{ав},$ B	$U_{вс},$ B	$U_{са},$ B	$U_{аб},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$I_a,$ A	I_b, A	$I_c,$ A	$P_a,$ Bm	$P_b,$ Bm	$P_c,$ Bm

После проведения опыта и снятия измерений, по формулам рассчитываются коэффициент трансформации, ток холостого хода в процентах, сопротивление холостого хода, реактивная и активная составляющие холостого хода, коэффициент мощности холостого хода.

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (1.1)$$

Ток холостого хода в процентах:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\% (1.2)$$

Сопротивление холостого хода:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0} (1.3)$$

Активная составляющая сопротивления холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} (1.4)$$

Реактивная составляющая сопротивления холостого хода:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} (1.5)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} (1.6)$$

Так же в таблицу 1.2 записываются средние значения напряжения первичной и вторичной обмотки трансформатора, средний ток, и средняя мощность.

$$U_{10cp} = \frac{U_{10} + U_{10} + U_{10}}{3} (1.7)$$

$$U_{20cp} = \frac{U_{20} + U_{20} + U_{20}}{3} (1.8)$$

$$I_{0cp} = \frac{I_0 + I_0 + I_0}{3} (1.9)$$

$$P_0 = P_0 + P_0 + P_0 (1.10)$$

Таблица 1.2 – Результаты вычислений по опыту холостого хода

№	Вычисления								
	U _{10cp} , В	U _{20cp} , В	I _{0cp} , А	P ₀ , Вт	cosμ ₀	Z ₀ , Ом	R ₀ , Ом	X ₀ , Ом	К

На основании расчётных параметров, строятся характеристики холостого хода, которые представляют собой зависимости I_0 , P_0 , $\cos\mu_0$, $Z_0 = f(U_{10})$.

Опыт короткого замыкания

В данном опыте исследуется повышающий трехфазный двухобмоточный трансформатор. Работа выполняется на лабораторном стенде. Схема стенда приведена на рисунке 1.8. Питание подается на обмотку НН трансформатора от сети, после включения автомата А. В качестве регулятора напряжения используется автотрансформатор, который расположен под столом стенда. Для измерения в цепи питания предусмотрен измерительный прибор К-505, позволяющий выполнять измерения в трех фазах.

Чтобы провести опыт, к обмотке НН проводят напряжение от регулятора напряжения, в то время как обмотка ВН накоротко замкнута. Перед началом опыта напряжение на выходе РН равняется нулю. Затем подводимое напряжение плавно повышают, пока ток в обмотке НН не достигнет номинальных значений, и записывают показания приборов во всех фазах. Опыт продолжают снимать, понижая напряжение обмотки НН. Следует сделать от 4 до 5 измерений. Результаты измерений записывают в таблицу 1.3

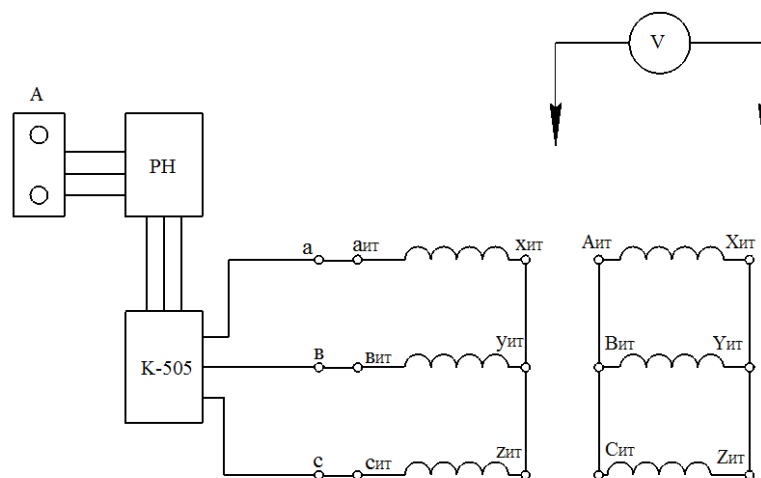


Рисунок 1.8 - Схема соединений для опыта короткого замыкания

Таблица 1.3 – Результаты измерений по опыту короткого замыкания

№	Измерения								
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	P_A, Bm	P_B, Bm	P_C, Bm

После проведения опыта и снятия измерений, по формулам рассчитываются коэффициент мощности, сопротивление короткого замыкания, активная и реактивная составляющие короткого замыкания. А также рассчитываются средние значения для трех фаз I , U , а мощность P находят как сумму мощностей трех фаз.

Коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos \mu_k = \frac{P_K}{\sqrt{3} I_k} \quad (1.11)$$

Сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_k} \quad (1.12)$$

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания:

$$R_k = \frac{P_k}{3 I_k^2} \quad (1.13)$$

Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания:

$$Z_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (1.14)$$

Среднее значение тока трех фаз:

$$I_k = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (1.15)$$

Среднее значение напряжения трех фаз:

$$U_k = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} \quad (1.16)$$

Сумма мощностей трех фаз:

$$P_k = P_A + P_B + P_C \quad (1.17)$$

Результаты всех вычислений записываются в таблицу 1.4. На основании результатов вычислений строятся характеристики короткого замыкания, представляющие собой зависимости I_k , P_k , $\cos \varphi_k$, $Z_k = f(U_k)$.

Таблица 1.4 – Результаты вычислений по опыту короткого замыкания

№	Вычисления						
	I_k, A	$U_k, \%$	P_k, Bm	$\cos \varphi_k$	$Z_k, Ом$	$R_k, Ом$	$X_k, Ом$

Опыт намагничивания сердечника

В данном опыте используется повышающий трехфазный двухобмоточный трансформатор. Работа выполняется на лабораторном стенде. Опыты проводят в режиме холостого хода, со схемой подключения холостого хода трехфазного трансформатора со схемами соединения Y/Y и Y/Δ .

Исследование трехфазного трансформатора по схеме соединения Y/Y .

Для исследования трансформатора собирается схема Y/Y , для этого устанавливаются перемычки a_1a , b_1b , c_1c и соединяются точки X , Y , Z . После этого на обмотку НН подаётся номинальное напряжение. Трансформатор при этом работает в режиме холостого хода. Схема опыта показана на рисунке 1.9. После сборки схемы, измеряются значения линейных и фазных первичных, вторичных напряжений и первичный ток. Измеренные величины осциллографируются, осциллограммы анализируются и копируются в отчет опыта. Результаты опыта заносятся в таблицу 1.5.

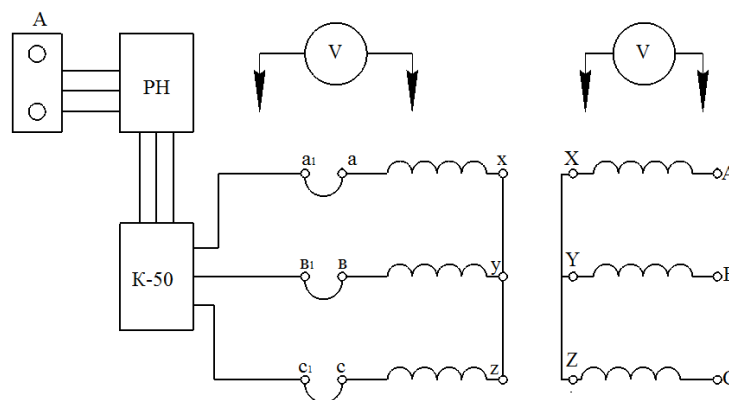


Рисунок 1.9 – Схема трехфазного трансформатора со схемой Y/Y

Таблица 1.5 – Результаты измерений по опыту намагничивания сердечника со схемой соединения Y/Y

U_1, B	$U_{1\Phi}, B$	I_1, A	U_2, B	$U_{2\Phi}, B$

Далее, вычисляется отношения $U_1/U_{1\phi}$, $U_2/U_{2\phi}$, затем вычисляется величины третьей гармоники напряжения в фазных первичных напряжениях по формуле:

$$U_3 \approx \sqrt{U_{1\phi}^2 - \frac{U_1^2}{3}} \quad (1.18)$$

Исследование трёхфазного трансформатора при схеме соединения Y/Δ.

Оставляя без изменения схему соединения обмотки НН, обмотка ВН собирается в схему «треугольник». Для этого точки X и B , Y и C , Z и A попарно замыкаются. После сборки схемы, включается автомат A и на входе обмотки НН устанавливается номинальное напряжение. Схема соединения изображена на рисунке 1.10. Измерить линейные и фазные первичные и вторичные напряжения и первичный ток. Измеренные величины осциллографируются и копируются в отчет опыта. Измеренные величины заносятся в таблицу 1.6.

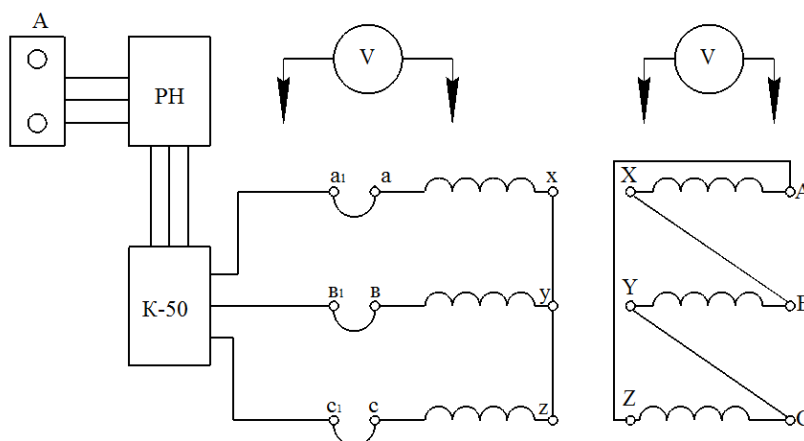


Рисунок 1.10 - Схема трехфазного трансформатора со схемой Y/Δ

Таблица 1.6 – Результаты измерений по опыту намагничивания сердечника со схемой соединения Y/Δ

U_1, B	$U_{1\phi}, B$	I_1, A	$U_{2\phi}, B$	$I_{2\Delta}, A$

Затем вычисляется отношение $U_1/U_{1\phi}$, $U_2/U_{2\phi}$ и величина третьей гармоники по формуле (1.18). Полученные результаты исследуются.

Опыт исследования группы соединений трансформатора

В опыте используется лабораторный стенд. На стенде установлен повышающий трехфазный трансформатор, питающийся от регулятора напряжения РН. Он позволяет регулировать напряжение от 0 до $1,2 U_H$. Напряжение на стенд подается с помощью автомата А. С помощью измерительного прибора К-505, измеряется напряжение, ток и мощность каждой фазы.

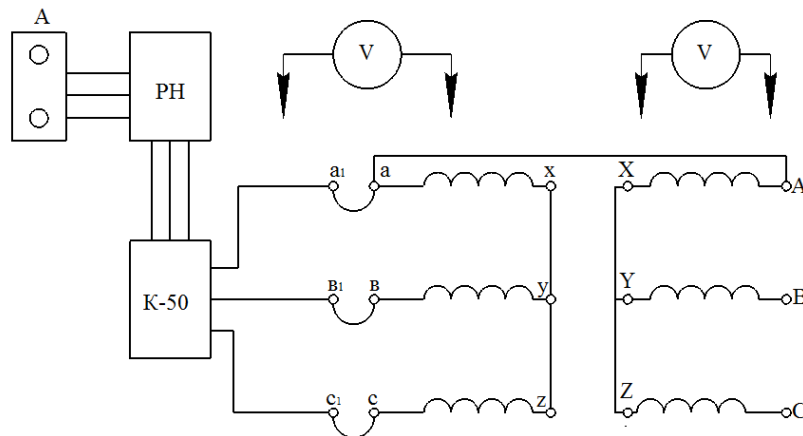


Рисунок 1.11 – Схема соединения при опыте определение групп соединений при схеме обмоток Y/Y

Перед выполнением опыта необходимо собрать схему, как показано на рисунке 1.11. Необходимо замкнуть проводом два зажима на высокой и низкой сторонах, зажимы А и а и подвести к первичной обмотке (НН) напряжение с помощью автомата А и регулятора напряжения РН. Уровень напряжения можно взять произвольно. Затем с помощью переносных вольтметров измерить линейные напряжения на сторонах НН и ВН, а так же между зажимами с-С, в-В, в-С, с-В. Данные измерений заносятся в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 – Результаты измерений по опыту исследования групп соединений

Схема	Группа соединений	$U_{ВН},$ В	$U_{НН},$ В	$U_{ВН},$ В		$U_{Вс},$ В		$U_{вс},$ В		$U_{сс},$ В	
				О	Р	О	Р	О	Р	О	Р
Y/Y											
Y/Y											
Y/ Δ											
Y/ Δ											

В трехфазных трансформаторах треугольник *ав* линейных ЭДС первичной обмотки может занимать относительно треугольника ABC линейных ЭДС вторичной обмотки 12 различных положений, соответствующих 12 группам соединений. При переходе от одной группы соединений к другой получаются различные значения напряжения $U_{\text{вВ}}, U_{\text{вс}}, U_{\text{св}}$. Для расчета значений этих напряжений необходимо построить соответствующие диаграммы линейных ЭДС обмоток НН и ВН. Для определения группы соединения необходимо использовать таблицу 1.11. Сравнивая измеренные напряжения $U_{\text{вВ}}, U_{\text{вс}}, U_{\text{св}}$ с соответствующими расчетными значениями определенные по таблице, устанавливая группу соединения трансформатора.

Необходимо обратить внимания на симметричность системы напряжений в трансформаторе, иначе возможна ошибка в определении группы.

1.4 Методические пособия по лабораторным работам

Методическое пособие по исследованию намагничивания сердечника трансформатора.

Цель – углубить и закрепить знания о процессах намагничивания сердечников однофазных и трехфазных трансформаторов, полученные на лекциях и при самостоятельном изучении теоретического материала, а также приобрести навыки экспериментального исследования трансформаторов.

Задача - изучить теоретический материал и методичку экспериментального исследования процессов при намагничивании сердечника трансформаторов.

1. Указания для подготовки к работе

Изучить темы учебного материала из курса «Электрические машины»: «Форма кривой тока холостого хода трансформаторов», «Явления, возникшие в однофазных и трехфазных трансформаторах при образовании магнитного поля» .

2. Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и записать паспортные трансформатора.
2. Исследовать в режиме холостого хода трехфазный стержневой трансформатор при $U_1 = U_{1H}$ для схем соединения обмоток Y/Y и Y/Δ , записать величины токов и напряжений, зарисовать формы фазных и линейных напряжений и токов.
3. Сравнить величины высших гармоник в магнитном потоке и фазных ЭДС при разных схемах соединения обмоток.

3. Выполнение работы

Перед выполнением работы необходимо внимательно ознакомиться со схемой стенда, регулирующей и измерительной аппаратурой.

3.1 Исследование трехфазного стержневого трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Y .

При установленных переключках aa_{um} , bb_{um} , cc_{um} соединить точки x_{um} , y_{um} , z_{um} , а так же точки A_{um} , B_{um} , C_{um} образовав схему Y/Y (Рисунок 1.12). Подать на обмотку НН номинальное напряжение. Трансформатор работает в режиме холостого хода. Измерить линейные и фазные первичные и вторичные напряжения и первичный ток, осциллографировать и скопировать осциллограммы этих величин. Результаты занести в таблицу 1.8.

До начала измерений прибору необходимо дать прогреться в течении 5 минут, затем повернуть регулятор «яркость» вправо до появления луча на

экране. Регуляторами «яркость» и «фокус» необходимо отрегулировать изображение, чтобы оно было четким и хорошо видимым. Регуляторами «Х» и «У» необходимо сместить луч в центр трубки. Регулятором «усиление» нужно изменить изображение до нормального размера. Регулятором «частота плавно» надо отрегулировать частоту генератора так, чтобы изображение «не бежало» по экрану. Если развертка не устойчива, регулятором «синхронизация» необходимо добиться устойчивой развертки.

Перед включением осциллографа регуляторы управления должны находиться в следующих положениях:

- регулятор «яркость» - в левом крайнем;
- регулятор «фокус» - в среднем;
- регуляторы «усиление» и «синхронизация» - в левом крайнем;
- переключатель «диапазон частот» - в положении «1».

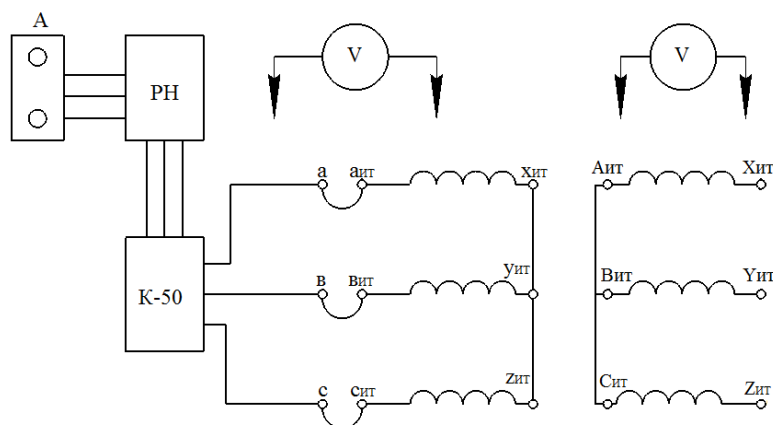


Рисунок 1.12– Схема соединения трехфазного трансформатора при схеме соединения Y/Y

Таблица 1.8 - Результаты опыта трансформатора при соединении обмоток Y/Y

U_1, B	$U_{1\phi}, B$	I_1, A	U_2, B	$U_{2\phi}, B$

Вычислить отношения $U_1/U_{1\phi}$, $U_2/U_{2\phi}$, затем величину третьей гармоники напряжения в фазных первичных напряжениях по формуле:

$$U_3 \approx \sqrt{U_{1\Phi}^2 - \frac{U_1^2}{3}} \quad (1.19)$$

Объяснить полученные результаты.

3.2 Исследование трехфазного стержневого трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ

Оставив без изменения схему соединения обмотки НН, для обмотки ВН собрать схему «треугольник» (Рисунок 1.13). Для этого необходимо замкнуть между собой попарно точки $X_{ит}$ и $C_{ит}$, $A_{ит}$ и $Y_{ит}$, $B_{ит}$ и $Z_{ит}$. Включить автомат А и установить на входе обмотки НН нормальное напряжение. Измерить первичные фазные и линейные напряжения, ток, вторичное фазное напряжение и ток на вторичной стороне, включив амперметр на стенде в расщепку треугольника ВН. Осциллографировать и скопировать осциллограммы измеренных величин. Результаты занести в таблицу 1.9.

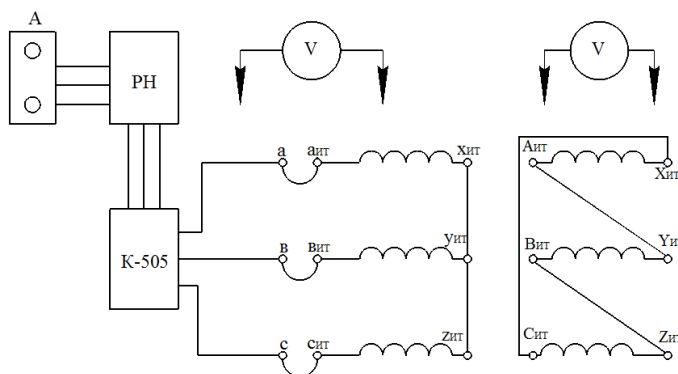


Рисунок 1.13 – Схема соединения трехфазного трансформатора Y/Δ

Таблица 1.9-Результаты опыта трансформатора при соединении обмоток Y/Δ

U_1, B	$U_{1\Phi}, B$	I_1, A	$U_{2\Phi}, B$	$I_{2\Delta}, A$

Вычислить отношение $U_1/U_{1\Phi}$, объяснить полученные результаты.

4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать следующие разделы:

1. Цель и задачи работы.
2. Лабораторный стенд: электрическая схема, краткое описание его устройства и порядок работы на нем при исследовании намагничивания сердечника трансформатора.
3. Результаты эксперимента: электрические схемы соединения обмоток трансформатора при исследованиях, измеренные и рассчитанные величины токов и напряжений, осциллограммы.
4. Анализ полученных результатов и заключение по каждому опыту.

Методическое пособие по исследованию групп соединений трехфазного трансформатора.

1. Цель – понять условия параллельной работы трансформаторов, научиться определять группу соединений обмоток трансформатора, а так же приобрести навыки экспериментального исследования трансформаторов при параллельной работе.

Задачи:

1. Изучить устройство стенда и способы управления им.
2. Изучить методику экспериментального определения групп соединений обмоток трансформатора.

2. Подготовка к работе.

По учебникам изучить темы «Группы соединений обмоток трансформаторов» и «Параллельная работа трансформаторов». По ГОСТ 3484-65 изучить способы определения соединения обмоток трансформаторов.

3. Программа работы.

1. Изучить электронную схему лабораторного стенда и записать паспортные данные трансформаторов.

2. Определить группы соединения трансформатора при различных схемах соединения обмоток используя метод двух вольтметров (аналитически и графически)

3. Определить напряжение короткого замыкания исследуемого трансформатора.

4. Собрать схему трансформаторов для включения на параллельную работу.

5. Провести фазировку трансформаторов на параллельную работу.

6. Включить трансформаторы на параллельную работу, снять и построить характеристики при изменяющейся нагрузке.

4. Описание установки.

В работе используется лабораторный стенд, схема которого представлена на рисунке 1.14. На стенде установлен трехфазный повышающий трансформатор, питающийся от регулятора напряжения РН, расположенного под столом стенда. Он позволяет регулировать напряжение от 0 до $1,2 U_n$. Подача напряжения на стенд осуществляется с помощью автомата А. В цепь обмотки НН включен измерительный прибор К-505, позволяющий измерять напряжение, ток и мощность в каждой фазе.

Для более точного измерения в цепях обмоток НН и ВН на стенде предусмотрены вольтметры со щупами. Обмотка НН имеет в каждой фазе разрыв, необходимый для выполнения других лабораторных работ. В данной работе этот разрыв устраняется с установкой перемычек.

Нагрузка трансформатора, представляющая набор регулируемых сопротивлений, включена в цепь обмотки ВН. Для измерения тока нагрузки в одной из фаз обмотки ВН предусмотрен амперметр. Нагрузка симметрична, поэтому измерять ток в других фазах нет необходимости. Остальные элементы стенда в данной работе не используются.

5. Выполнение работы.

Перед выполнением работы необходимо внимательно ознакомиться со схемами стендов, регулирующей и измерительной аппаратурой.

1. Определение групп соединений.

Собрать схемы соединения обмоток трансформатора (рисунок 1.15 и 1.16), замкнуть проводом два одноименных зажима на высокой и низкой сторонах, например, зажимы А и а, подвести к первичной обмотке (НН) напряжение с помощью автомата (А) и регулятора напряжения (РН), расположенного под столом стенда. Уровень напряжения, подведенного к обмотке НН, можно взять произвольной, например, 30 В. Затем с помощью переносных вольтметров измерить линейные напряжения на сторонах НН и ВН, а так же напряжения между зажимами $c_{ИТ}-C_{ИТ}$, $в_{ИТ}-B_{ИТ}$, $c_{ИТ}-B_{ИТ}$, $в_{ИТ}-C_{ИТ}$. Данные измерений занести в таблицу 1.10.

В трехфазных трансформаторах треугольник $ав$ с линейных ЭДС обмотки НН может занимать относительно треугольника ABC линейных ЭДС вторичной обмотки (ВН) двенадцать различных положений, соответствующих двенадцати группам соединений. При переходе от одной группы соединений к другой положений треугольника OL^A относительно треугольника ABC меняется, в связи с этим получают различные значения напряжений $U_{\epsilon B}$, $U_{\epsilon C}$, U_{CB} , U_{CC} . Для расчета этих напряжений нужно построить соответствующие диаграммы линейных ЭДС обмоток НН и ВН.

Предположим, что мы имеем нулевую группу соединений. В этом случае угловое смещение треугольников соответствует положению, изображенному на рисунке 1.17. Тогда:

$$U_{CC} = U_{\epsilon B} = U_{HH}(K_L - 1) \quad (1.20)$$

$$U_{BC} = U_{CB} = \sqrt{U_{HH}^2 + U_{HH}^2(K_L - 1)^2 + U_{HH}^2(K_L - 1)^2} = U_{HH} \sqrt{1 - K_L + K_L^2} \quad (1.21)$$

где U_{HH} – линейное напряжение на зажимах обмотки НН;

K_L – коэффициент трансформации линейных напряжений.

$$K_L = \frac{U_{BH}}{U_{HH}}; \quad (1.22)$$

m_U – масштаб напряжений, в котором построена диаграмма.

Аналогичные расчеты для остальных одиннадцати групп сведены в таблице 1.11. Сравнивая измеренные напряжения $U_{\epsilon B}$, $U_{\epsilon C}$, U_{CB} с соответствующими

расчетными значениями, определенными по таблице, устанавливаем группу соединения обмоток трансформатора.

Особое внимание нужно обратить на симметричность системы напряжений в трансформаторе, иначе может произойти ошибка в определении группы.

Описанный способ определения групп соединения обмоток предполагает наличие таблиц. При отсутствии таблиц группу можно определить графически построением треугольника линейных напряжений a в c . [8]

Таблица 1.10- Результаты опыта по исследованию группы соединений

Схема	Группа соединений	$U_{ВН},$ В	$U_{НН},$ В	$U_{ВН},$ В		$U_{Вс},$ В		$U_{вс},$ В		$U_{сс},$ В	
				О	Р	О	Р	О	Р	О	Р
Y/Y											
Y/Y											
Y/ Δ											
Y/ Δ											

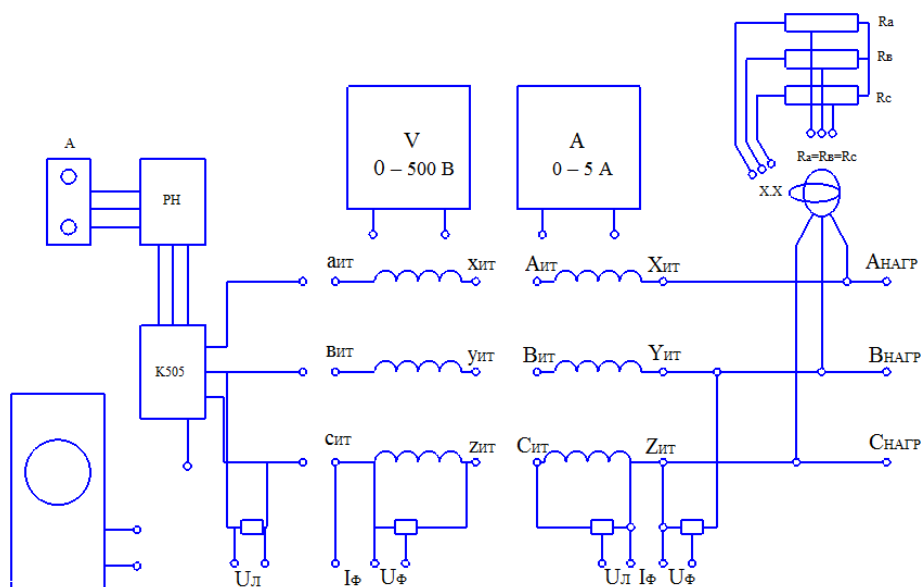


Рисунок 1.14 – Электрическая схема стенда

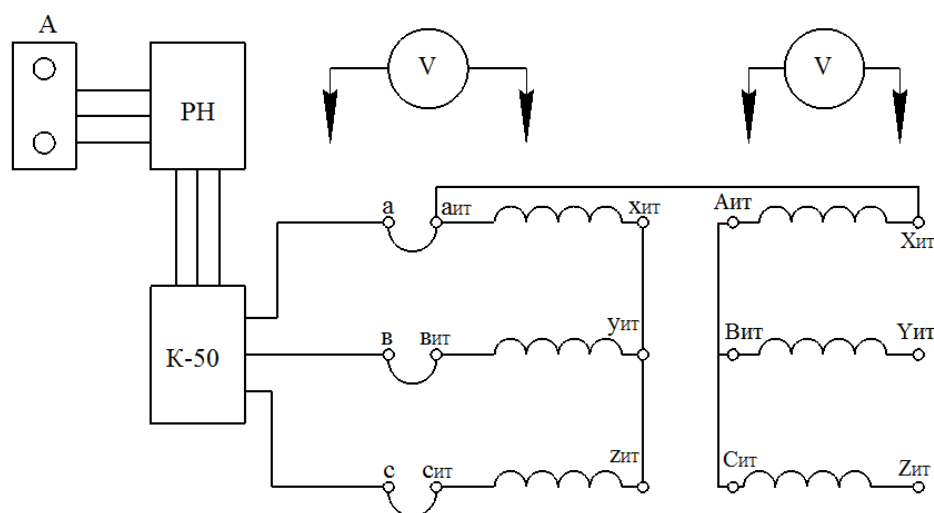


Рисунок 1.15 – Определение групп соединений при схеме обмоток Y/Y

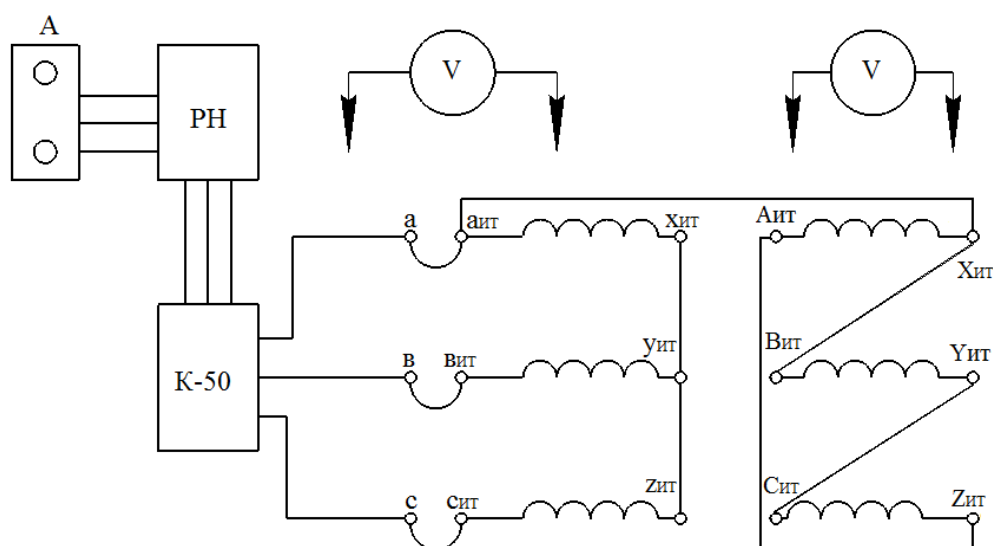


Рисунок 1.16 – Определение группы соединений при схеме обмоток Y/Δ

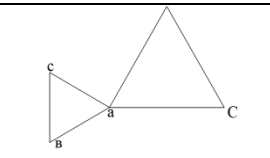
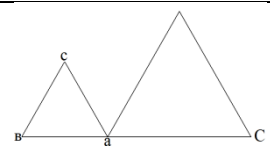
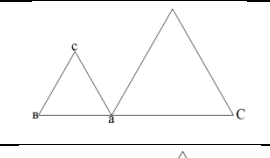
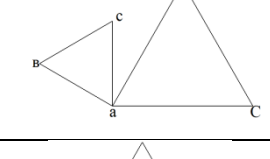
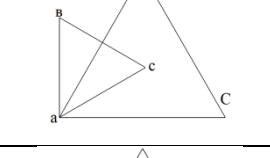
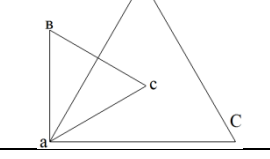
Для построения треугольника ABC считаем точку A совмещенной с точкой a , так как зажимы A и a соединены проводом; точку B находим на пересечении дуг окружностей, проведенных из точек a и c как из центров радиусами, равными измеренным напряжениям U_{aB} и U_{cB} ; точку C – на пересечении дуг окружностей тех же центров радиусами, равными измеренным напряжениям U_{aC} и U_{cC} . Масштаб для построения всех напряжений должен быть одинаковым.

Группа соединений определяется углом между одноименными сторонами треугольников ABC и abc , измеренным по направлению часовой стрелки от стороны треугольника обмотки ВН.

Таблица 1.11 – таблица для расчета групп соединений трансформатора

Группа соед.	Угловое смещение ЭДС	Векторная диаграмма линейных ЭДС	U_{VB}	U_{VC}	U_{CB}
0	0°		$u_{HH}(K_L - 1)$	$u_{HH} \sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 - K_L + K_L^2}$
1	30°		$u_{HH} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 + K_L^2}$
2	60°		$u_{HH} \sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$u_{HH}(K_L - 1)$	$u_{HH} \sqrt{1 + K_L + K_L^2}$
3	90°		$u_{HH} \sqrt{1 + K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$
4	120°		$u_{HH} \sqrt{1 + K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$u_{HH}(K_L + 1)$
5	150°		$u_{HH} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 + K_L^2}$	$u_{HH} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$

Продолжение таблицы 1.11

6	180°		$u_{HH}(K_L + 1)$	$u_{HH} \overline{1 + K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 + K_L + K_L^2}$
7	210°		$u_{HH} \overline{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 + K_L^2}$
8	240°		$u_{HH} \overline{1 + K_L + K_L^2}$	$u_{HH}(K_L + 1)$	$u_{HH} \overline{1 - K_L + K_L^2}$
9	270°		$u_{HH} \overline{1 + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$
10	300°		$u_{HH} \overline{1 - K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 + K_L + K_L^2}$	$u_{HH}(K_L - 1)$
11	330°		$u_{HH} \overline{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 + K_L^2}$	$u_{HH} \overline{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$

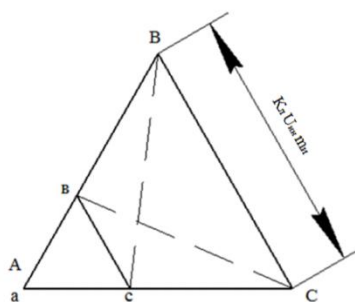


Рисунок 1.17 - Треугольник линейных напряжений для групп соединений

Методическое пособие по исследованию трехфазного трансформатора по методу холостого хода и короткого замыкания

1. Цель и задачи лабораторной работы.

Цель – достичь глубокого понимания физических процессов в режимах холостого хода и короткого замыкания трансформаторов и приобрести навыки экспериментального исследования работы трансформаторов в этих режимах.

Задачи работы – изучить устройство стенда и способы управления им, методику экспериментального исследования трансформаторов в опытах холостого хода и короткого замыкания.

2. Подготовка к работе

В процессе самостоятельной работы над материалом курса «Электрические машины» необходимо изучить темы «Конструкция активных частей и принцип действия силовых трансформаторов», «Уравнения ЭДС, МДС и токов», «Схема замещения трансформаторов» и «Экспериментальное определение параметров схемы замещения и потерь из опытов холостого хода и короткого замыкания».

3. Программа работы

1. Выполнить задания – тесты по теме занятия.
2. Изучить электрическую схему лабораторного стенда, возможность регулирования питающего напряжения.
3. Собрать схемы и провести опыт холостого хода. Сделать необходимые вычисления, получить характеристики и объяснить их ход.
4. Собрать схему и провести опыт короткого замыкания. Сделать необходимые вычисления, получить характеристики и объяснить их ход.

4. Общие положения

Трансформатор статический электромагнитный аппарат с двумя (или больше) обмотками, преобразующий систему переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при сохранении частоты.

Трансформатор состоит из первичных обмоток, расположенных на магнитопроводе, собранном из листов электротехнической стали. Если

первичное напряжение меньше вторичного, трансформатор называется повышающим; если больше вторичного – понижающим.

Обмотки высшего напряжения (ВН) принято обозначать прописными буквами латинского алфавита: Начала *A, B, C*, концы обмоток соответственно *X, Y, Z*, а обмотки низкого напряжения (НН) – строчными: начала *a, b, c*, концы *x, y, z*.

Опыт холостого хода дает возможность определить свойства обмоток трансформатора в отношении величины свойства сердечника трансформатора в отношении напряжения короткого замыкания, потерь в обмотках и элементах конструкции.

Совместно опыты холостого хода и короткого замыкания образуют метод, который дает возможность определить все характеристики трансформатора, работающего под нагрузкой: изменение напряжения, коэффициент полезного действия и др. К этим опытам предъявляются высокие требования в отношении точности их проведения.[7]

5. Описание установки

В данной лабораторной работе исследуется повышающий трехфазный двухобмоточный трансформатор. Конструкция магнитопровода – стержневая. работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Схема стенда приведена на рисунке 1.19. Питание на обмотку НН трансформатора подается от сети включением автомата. А через регулятор напряжения РН. В качестве РН используется трехфазный автотрансформатор, расположен он на полу под столом стенда.

С целью использовать стенд для других исследований трансформатора в цепи обмотки НН предусмотрен разрыв, исключить который можно поставив перемычки.

Для измерения в цепи питания предусмотрен комплексный измерительный прибор К-50, позволяющий выполнять измерения в трех фазах. Для более точного измерения напряжений в трансформаторе на стенде предусмотрены вольтметры с переносными щупами.

Переключатель «Пн» ставится в положение «Х.Х».

6. Опыт холостого хода

Чтобы провести опыт холостого хода трансформатора, при разомкнутой обмотке ВН к обмотке НН подводят регулируемое с помощью регулятора напряжения (РН) напряжение в пределах от 0,3 до 1,1 $U_{1Н}$ (рисунок 1.20).

Обмотки соединены по схеме Y/Y. Измеряют первичное напряжение U_{10} , ток I_0 , мощность P_0 , а так же вторичное напряжение U_{20} . Измерения проводят в трех фазах, т. к. ток холостого хода насыщенного стержневого трансформатора не симметричен и не синусоидален. Показания приборов записывают (таблица 1.12). Целесообразно не менее 6 замеров.

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (1.23)$$

Ток холостого хода в процентах:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1Н}} \cdot 100\% \quad (1.24)$$

Сопротивление холостого хода:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0} \quad (1.25)$$

Активная составляющая сопротивления холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (1.26)$$

Реактивная составляющая сопротивления холостого хода:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (1.27)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} \quad (1.28)$$

Таблица 1.12 – Результаты измерений опыта холостого хода

№	Измерения											
	$U_{ав},$ B	$U_{вс},$ B	$U_{са},$ B	$U_{ав},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	$I_a,$ A	I_b, A	$I_c,$ A	$P_a,$ Bm	$P_b,$ Bm	$P_c,$ Bm

Таблица 1.13 – Результаты вычислений

№	Вычисления								
	$U_{10}, В$	$U_{20}, В$	$I_0, А$	$P_0, Вт$	$\cos\mu_0$	$Z_0, Ом$	$R_0, Ом$	$X_0, Ом$	K

В таблице 1.13 заносят расчетные параметры, на основании которых строят на общей координатной сетке характеристики холостого хода, представляющие собой зависимости $I_0, P_0, \cos\mu_0, Z_0 = f(U_{10})$. На характеристиках отмечают $I_{0н}, P_{0н}, \cos\mu_{0н}$ соответствующие напряжению $U_{1н}$ (рисунок 1.21).

Для проведения опыта короткого замыкания нужно подвести напряжение ко вторичной обмотке, а первичную замкнуть накоротко (рисунок 1.22).

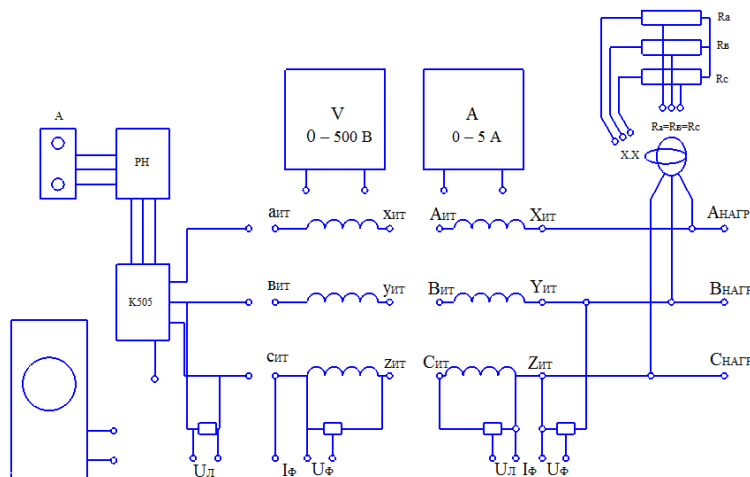


Рисунок 1.19 – Схема лабораторного стенда.

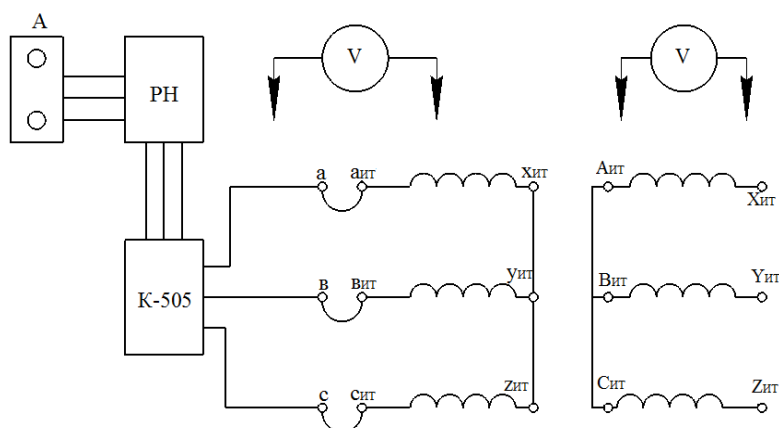


Рисунок 1.20 – Схема соединений для опыта холостого хода.

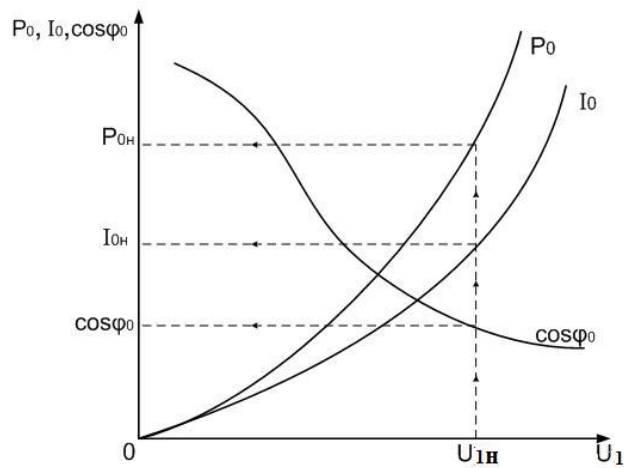


Рисунок 1.21 – Характеристики холостого хода.

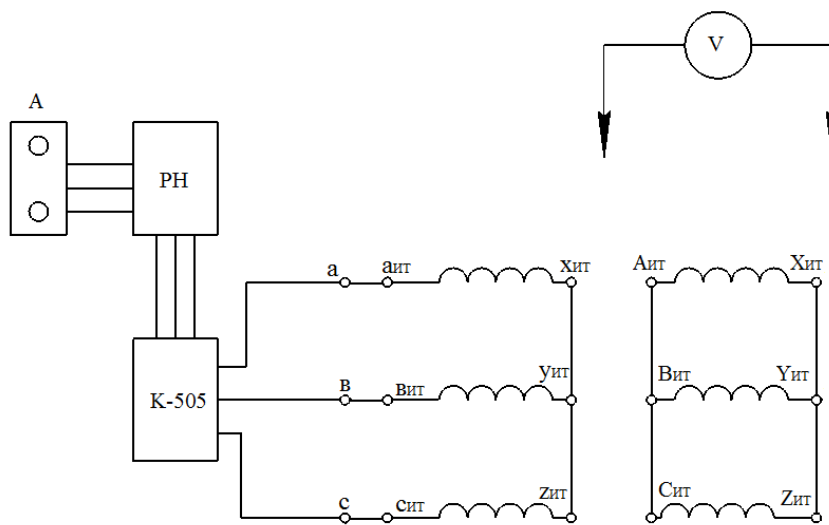


Рисунок 1.22 – Схема соединений для опыта короткого замыкания

Перед началом опыта напряжение на выходе РН должно равняться нулю. Затем подводимое напряжение плавно повышают, пока ток в обмотке НН не достигнет I , I_{2H} , и записывают показания приборов во всех фазах. Продолжают опыт, понижая напряжение обмотки. Целесообразно снять 4 – 5 точек. Результаты измерений записывают в таблицу 1.14. Так же, как в опыте холостого хода, рассчитывают средние для всех трех фаз значения I_k , U_k , а мощность P_k находят как сумму трех фаз.

На основании этих величин рассчитывают следующие параметры трансформаторов:

Коэффициент мощности при коротком замыкании:

$$\cos \mu_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} I_k} \quad (1.29)$$

Сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_k} \quad (1.30)$$

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания:

$$R_k = \frac{P_k}{3 I_k^2} \quad (1.31)$$

Реактивная составляющая сопротивления короткого замыкания:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (1.32)$$

Таблица 1.14 – Результаты измерений по опыту короткого замыкания

№	Измерения								
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	U_{AB}, B	U_{BC}, B	U_{CA}, B	P_A, Bm	P_B, Bm	P_C, Bm

Таблица 1.15 – Результаты вычислений по опыту короткого замыкания

№	Вычисления						
	I_k, A	U_k, B	P_k, Bm	$\cos \varphi_k$	$Z_k, Ом$	$R_k, Ом$	$X_k, Ом$

Напряжение короткого замыкания в процентах:

$$U_k = \frac{U_k}{U_{2H}} 100\% \quad (1.33)$$

В таблице 1.14 заносят все расчетные параметры, на основании которых строят характеристики короткого замыкания, представляющие собой зависимости I_k , P_k , $\cos \varphi_k$, $Z_k = f(U_k)$. По этим характеристикам находят номинальное значение напряжения короткого замыкания $U_{кн}$ и номинальную мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$ соответствующие $I_k = I_{2H}$ (рисунок 1.23).

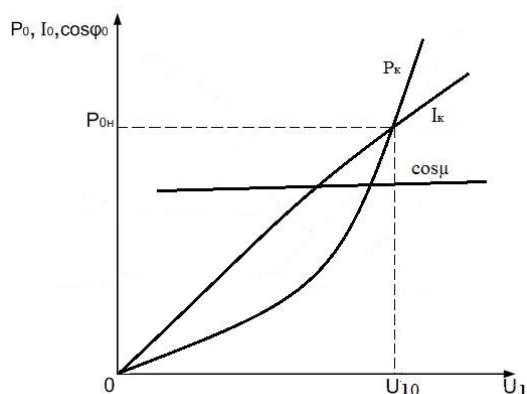


Рисунок 1.23 – Характеристики короткого замыкания.

Содержание отчета по работе.

Отчет по работе должен иметь следующие разделы:

1. Цель и задачи работы

Они должны быть сформулированы в соответствии с методическими указаниями.

2. Краткое описание трансформатора

Указать название силового трансформатора, принцип действия, дать краткое описание устройства активной части, нарисовать эскиз магнитной цепи.

3. Описание лабораторного стенда

Начертить схему лабораторного стенда и дать его краткое описание, указать последовательность порядка работы на нем при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания.

4. Результаты эксперимента

Перечислить, какие эксперименты были выполнены, и какие результаты получены. Провести таблицы экспериментальных данных вместе с результатами расчетов, формулы, по которым выполнены расчеты; графики зависимостей, являющиеся предметом исследования.

5. Анализ результатов исследования.

Сделать анализ полученных результатов на основе графиков зависимостей, объяснить их ход и сделать выводы.

2 Исследование характеристик испытуемого трансформатора

2.1 Исследование трансформатора лабораторного стенда в режиме холостого хода

Для проведения эксперимента, лабораторный стенд должен работать в режиме холостого хода. Для этого при разомкнутой обмотки ВН к обмотке НН подводилось регулируемое с помощью регулятора напряжение (РН) напряжение в пределах номинала. Обмотки соединены по схеме Y/Y. Измеряются первичное напряжение, первичный ток, мощность и вторичное напряжение U_2 . Все значения измерений заносятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений по опыту холостого хода

№	Измерения											
	$U_{ав},$ B	$U_{вс},$ B	$U_{са},$ B	$U_{ав},$ B	$U_{BC},$ B	$U_{CA},$ B	I_a, A	I_b, A	I_c, A	$P_a,$ Bm	$P_b,$ Bm	$P_c,$ Bm
1	220	224	220	410	405	396	1,325	1,05	1,17	27,5	22,5	7,5
2	216	212	212	389	380	381	0,95	0,87	0,9	7,5	22,5	7,5
3	205	201	201	374	362	362	0,77	0,65	0,7	12,5	15	2,5
4	194	190	190	354	344	343	0,65	0,5	0,52	10	12,5	2,5
5	179	175	175	323	315	316	0,37	0,3	0,32	7,5	10	2,5
6	160	153	154	289	278	278	0,2	0,16	0,15	7	6	3

После записи результатов измерений, вычисляются величины коэффициента трансформации, тока холостого хода, сопротивления холостого хода, коэффициента мощности холостого хода, активные и реактивные составляющие сопротивления.

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (2.1)$$

Ток холостого хода в процентах:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\% (2.2)$$

Сопротивление холостого хода:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0} (2.3)$$

Активная составляющая сопротивления холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} (2.4)$$

Реактивная составляющая сопротивления холостого хода:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} (2.5)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} (2.6)$$

Среднее значение тока трех фаз:

$$I_k = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} (2.7)$$

Среднее значение напряжения трех фаз:

$$U_k = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} (2.8)$$

Сумма мощностей трех фаз:

$$P_k = P_A + P_B + P_C (2.9)$$

Таблица 2.2 – Результаты вычислений по опыту холостого хода

№	Вычисления								
	U ₁₀ , В	U ₂₀ , В	I ₀ , А	P ₀ , Вт	cosμ ₀	Z ₀ , Ом	R ₀ , Ом	X ₀ , Ом	K
1	221,3	403,6	1,18	57,5	0,1	107,9	13,68	107,11	0,54
2	213,3	383,3	0,91	37,5	0,11	135,59	15,15	134,74	0,55
3	202,3	366	0,71	30	0,12	164,9	19,93	163,71	0,55
4	191	347	0,56	25	0,13	197,5	26,73	195,68	0,55
5	176,3	318	0,33	20	0,19	305,4	60	299,46	0,55
6	155,6	281,6	0,17	16	0,35	528,67	184,54	495,41	0,55

На основе результатов вычислений, строятся характеристики холостого хода, которые представляют собой зависимость тока, мощности, коэффициента мощности от напряжения.

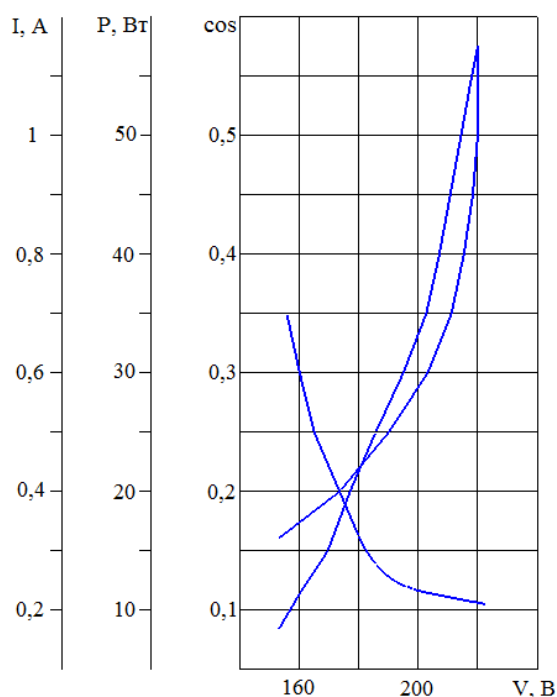


Рисунок 2.1– Характеристики холостого хода трансформатора

На графике характеристик холостого хода трансформатора видно, что при увеличении первичного напряжения, то есть насыщения трансформатора, величины тока и мощности увеличиваются, а коэффициент мощности холостого хода уменьшается. Трансформатор потребляет активную мощность, при холостом ходе, которая расходуется на потери в стали трансформаторе, потери меди в первичной обмотке при холостом ходе малы.

2.2 Исследование трансформатора лабораторного стенда в режиме короткого замыкания.

Для проведения эксперимента, лабораторный стенд должен работать в режиме короткого замыкания. Для этого одна из обмоток замыкается, а к другой подводится напряжение. Измеряются первичное напряжение,

первичный ток, мощность и вторичное напряжение U_2 . Измерения проводились в трех фазах. Все значения измерений заносятся в таблицу 2.3. Для получения графика характеристик короткого замыкания, показания измеряются не меньше 6 раз.

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (2.10)$$

Ток холостого хода в процентах:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Сопротивление холостого хода:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0} \quad (2.12)$$

Активная составляющая сопротивления холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (2.13)$$

Реактивная составляющая сопротивления холостого хода:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (2.14)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} \quad (2.15)$$

Среднее значение тока трех фаз:

$$I_k = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (2.16)$$

Среднее значение напряжения трех фаз:

$$U_k = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} \quad (2.17)$$

Сумма мощностей трех фаз:

$$P_k = P_A + P_B + P_C \quad (2.18)$$

Таблица 2.3 – Результаты измерений по опыту короткого замыкания

№	Измерения											
	$U_{ав},$	$U_{вс},$	$U_{са},$	$U_{ав},$	$U_{BC},$	$U_{CA},$	$I_a,$	I_b, A	$I_c,$	$P_a,$	$P_{в},$	$P_c,$
	B	B	B	B	B	B	A		A	Bm	Bm	Bm
1	12	9	9,3	0	0	0	4,8	5,6	5,4	20	28	24
2	10,8	7,4	7,9	0	0	0	3,7	4,5	4	12	18	16
3	8,9	6,2	6,4	0	0	0	3,9	3,8	3,6	8	14	12
4	8,1	4,7	5,7	0	0	0	2,7	3,4	2,6	6	10	6
5	6,8	3,7	4,5	0	0	0	2,7	2,7	1,6	6	6	2

После записи результатов измерений, вычисляются величины коэффициента трансформации, тока холостого хода, сопротивления холостого хода, коэффициента мощности холостого хода, активные и реактивные составляющие сопротивления. На основе данных величин строится характеристика холостого хода.

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (2.19)$$

Ток холостого хода в процентах:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} \cdot 100\% \quad (2.20)$$

Сопротивление холостого хода:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0} \quad (2.21)$$

Активная составляющая сопротивления холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (2.22)$$

Реактивная составляющая сопротивления холостого хода:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (2.23)$$

Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} \quad (2.24)$$

Таблица 2.4 – Результаты вычислений по опыту короткого замыкания

№	Вычисления						
	I_k, A	U_k, B	P_k, Bm	$\cos\varphi_k$	$Z_k, Ом$	$R_k, Ом$	$R_k, Ом$
1	5,26	10,1	72	0,78	1,11	0,86	0,86
2	4,06	8,7	46	0,75	1,23	0,92	0,92
3	3,76	7,16	34	0,72	1,1	0,79	0,8
4	2,9	6,16	22	0,71	1,23	0,87	0,87
5	2,33	5	14	0,69	1,24	0,89	0,86

На основе результатов вычислений, строятся характеристики короткого замыкания, которые представляют собой зависимость тока, мощности, коэффициента мощности от напряжения.

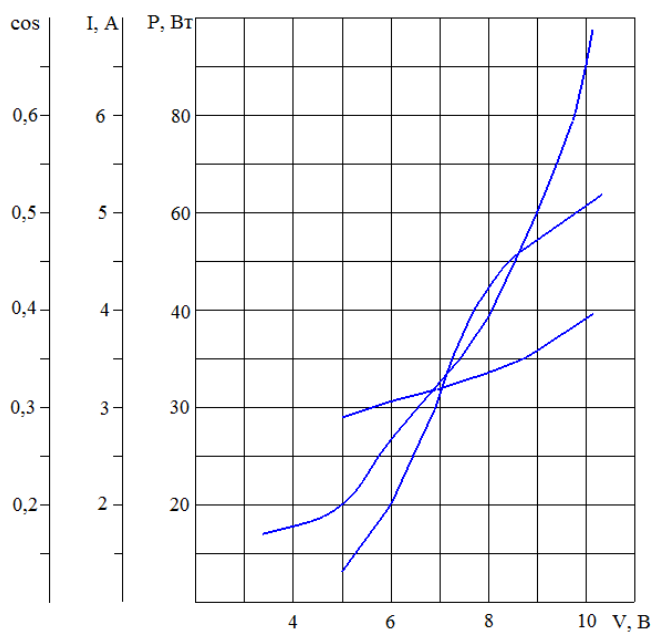


Рисунок 2.2– Характеристики короткого замыкания

На графике характеристик короткого замыкания, видно что при повышении первичного напряжения ток и мощность трансформатора

значительно увеличиваются, а коэффициент мощности незначительно повышается.

2.3 Исследование намагничивания сердечника трансформатора лабораторного стенда

Исследование трансформатора по схеме Y/Y.

Для исследования трансформатора по схеме Y/Y, на первичную обмотку подается номинальное напряжение, а конец первичной обмотки соединяется в одну точку. Вторичная обмотка так же соединяется в одну точку. Трансформатор при этом работает в режиме холостого хода. Для исследования измеряются величины линейных и фазных, первичных и вторичных напряжения и первичный ток, и так же снимаются из осциллограммы.

Таблица 2.5 – Показания измерений опыта

$U_{1л}, В$	$U_{1ф}, В$	$I_1, А$	$U_{2ф}, В$	$U_{2л}, А$
220	124	1,62	397	220

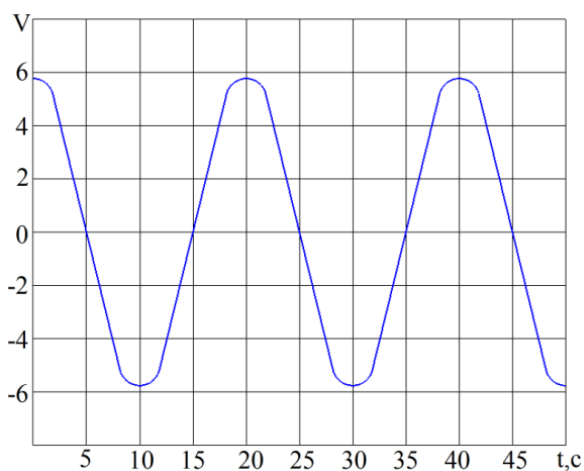


Рисунок 2.3– Осциллограмма первичного фазного напряжения при схеме соединения Y/Y

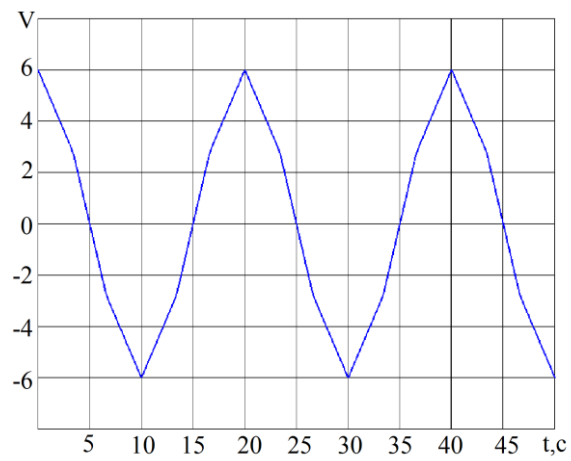


Рисунок 2.4 – Осциллограмма первичного линейного напряжения при схеме соединения Y/Y

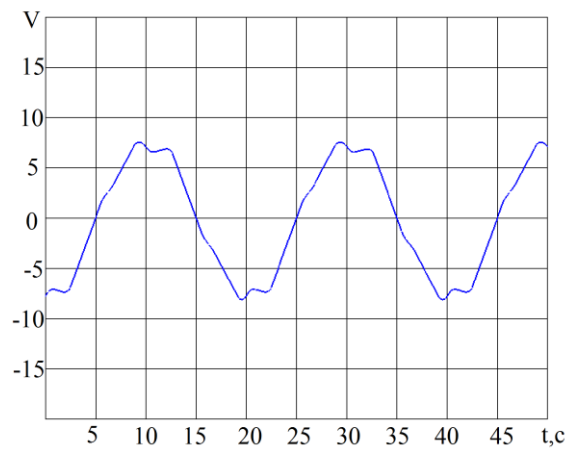


Рисунок 2.5 – Осциллограмма первичного тока при схеме соединения Y/Y

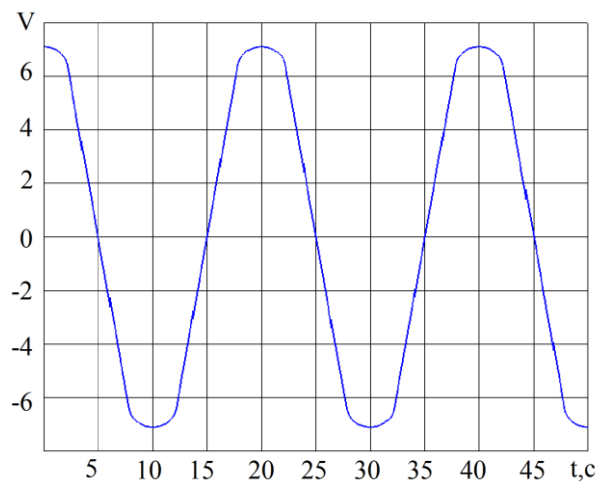


Рисунок 2.6 – Осциллограмма вторичного фазного напряжения при схеме соединения Y/Y

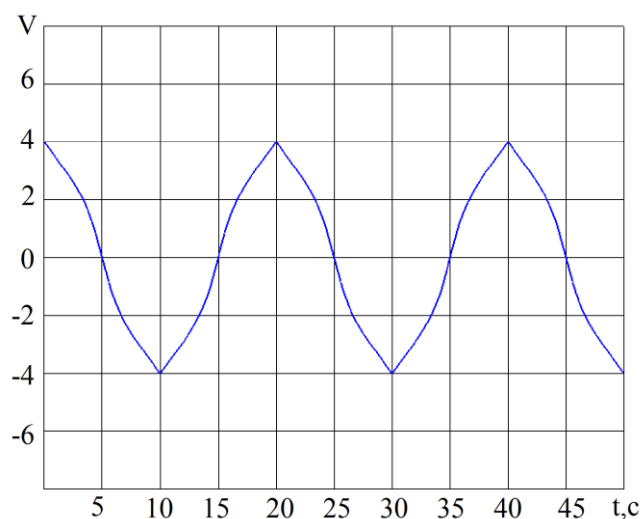


Рисунок 2.7 – Осциллограмма вторичного линейного напряжения при схеме соединения Y/Y

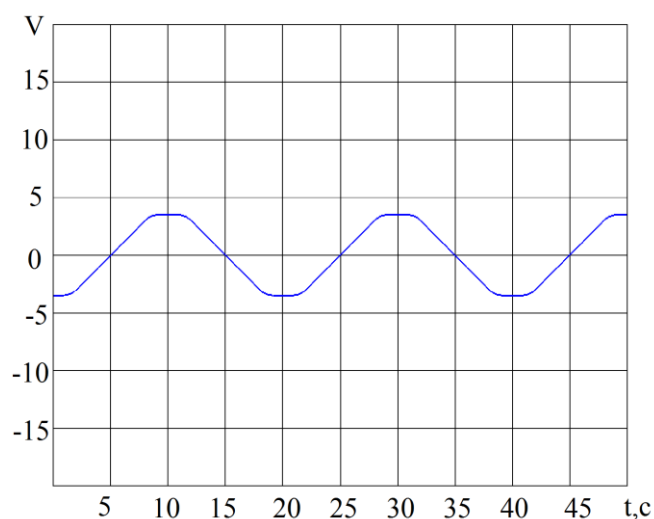


Рисунок 2.8 – Осциллограмма вторичного тока при схеме соединения Y/Y

Исследование трансформатора по схеме Y/Δ

Для исследования трансформатора по схеме Y/Δ, после проведения опыта по схеме Y/Y, схему соединения первичной обмотки оставляют без изменений. Вторичная обмотка соединяется в схему треугольника для этого с помощью перемычек соединяются точки A-Y, B-Z, C-X. Трансформатор при проведении опыта работает в холостом режиме. Для исследования измеряются величины

линейных и фазных, первичных и вторичных напряжения и первичный ток, и так же снимаются из осциллограммы.

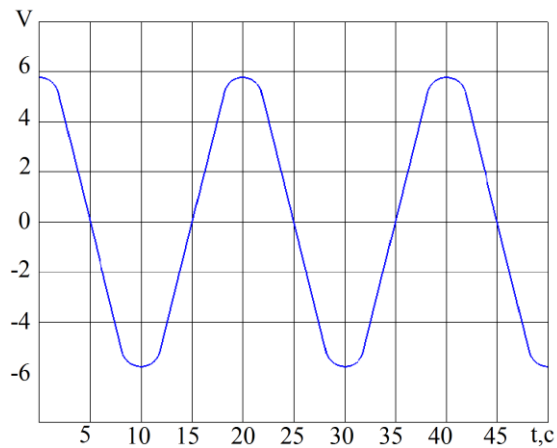


Рисунок 2.9 – Осциллограмма первичного фазного напряжения при схеме соединения Y/Δ

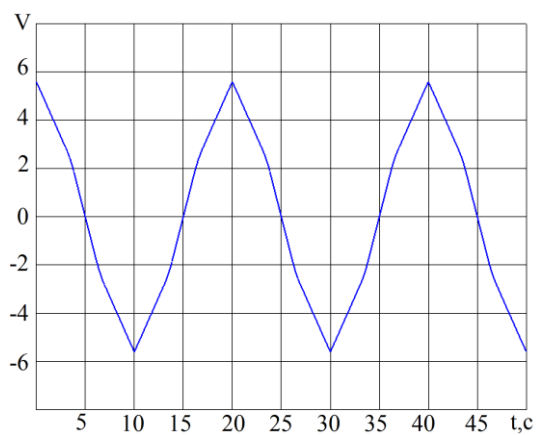


Рисунок 2.10 – Осциллограмма первичного линейного напряжения при схеме соединения Y/Δ

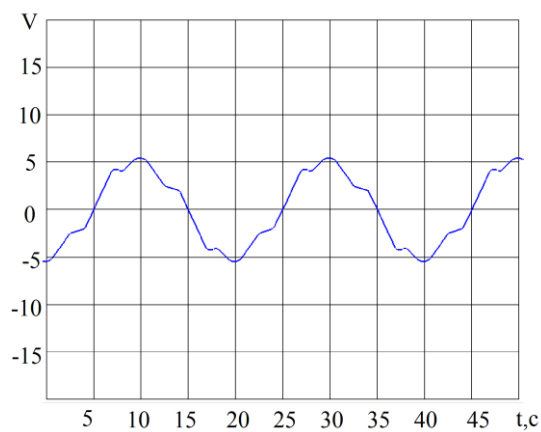


Рисунок 2.11 – Осциллограмма первичного тока при схеме соединения Y/Δ

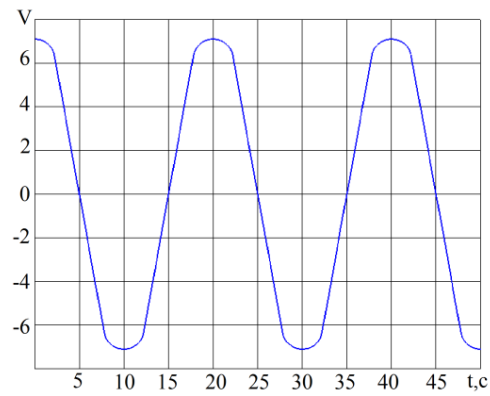


Рисунок 2.12 – Осциллограмма вторичного фазного напряжения при схеме соединения Y/Δ

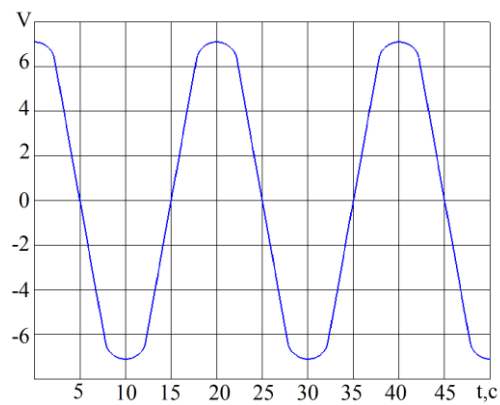


Рисунок 2.13 – Осциллограмма вторичного линейного напряжения при схеме соединения Y/Δ

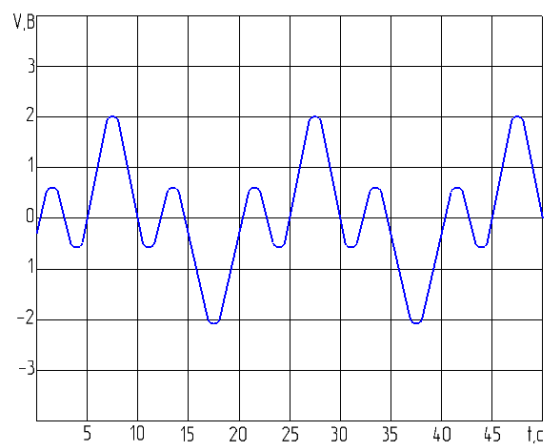


Рисунок 2.14 – Осциллограмма вторичного тока при схеме соединения Y/Δ

Вывод: Каждая фаза обмотки соединенной в треугольник будет приключена к синусоидальному напряжению, т. е. потоки каждой из фаз будут содержать нечетные высшие гармоники. В каждой фазе высшие гармоники, расположены относительно основной гармоники тока.

3 Правила эксплуатации лабораторного стенда

Питание лабораторного стенда происходит от общей сети напряжением 220 В, в следствие этого при нарушении изоляции на проводах и перемычках, может возникнуть опасное для жизни человека напряжение. Поэтому студентам запрещено проводить любые действия с лабораторным стендом без лаборанта. Подача питающего напряжения в собранной схеме, осуществляется автоматом, который размещен на стенде. При выполнении лабораторных работ студентам запрещается: 1) начинать лабораторную работу, без наличия допуска на выполнение лабораторной работы; 2) осуществлять работу, которая не связана с данной лабораторной работой; 3) самостоятельно, без лаборанта подключать питание к стенду; 4) включать питание на собранной схеме. без проверки правильности её соединения; 5) пользоваться оборудованием, которое не входит в комплект данной лабораторной работы, без указаний лаборанта 6) изменять схему соединения лабораторного стенда, при включенном питании 7) покидать лабораторию после завершения работы, не показав результаты по лабораторной работе лаборанту или преподавателю и не сдав полученное оборудование. Разборка схемы разрешается только после проверки преподавателем результатов измерений преподавателем. Перед разборкой схемы необходимо отключить питание стенда. При возникновении неисправностей в работе лабораторного стенда, следует сообщить о неисправности лаборанту.

4 Подбор комплектующих изделий стенда

Расчет стоимости затрат на комплектующие изделия

Затраты на покупные комплектующие изделия:

$$C_{\Pi} = S_{\Pi} (1 + K_{мз}^n) = 35725 \cdot (1 + 0,05) = 37511,25 \text{ руб.}, \quad (4.1)$$

где S_{Π} - стоимость покупных комплектующих изделий, $S_{\Pi} = 35725$ руб. (таблица 4.1);

$K_{мз}^n$ - коэффициент транспортно-заготовительных расходов, $K_{мз}^n = 5\%$.

Таблица 4.1 – Стоимость комплектующих изделий лабораторного стенда

№ п/п	Наименование комплектующих изделий	Кол-во. шт.	Цена, руб./шт.	Стоимость всего количества, руб.
1	Сухой трехфазный трансформатор ТС – 1,0/0,38	1	8600	8600
2	Автотрансформатор	1	14300	14300
3	Измерительный прибор К-505	1	9000	9000
4	Вольтметр	2	370	740
5	Амперметр	1	410	410
6	Комплект болтов и гаек	60	5	300
7	Кабель силовой РГКМ	10 м	90	900
8	Медный провод, 0,75 мм ²	2 м	30	60
9	Потенциометр, 100 Ом	2	310	620
10	Шунт, 30А 75мВ	3	150	450
11	Переключатель поворотный	1	345	345
Итого $S_{м}$,руб.			35725	

Заработная плата производственных рабочих:

$$З_{осн.пр} = З_{тар}(1 + K_{пр}) = 3705 \cdot (1 + 0,25) = 4631,25 \text{ руб.}, \quad (4.2)$$

где $З_{тар}$ - тарифная заработная плата, $З_{тар.пр} = 3705$ руб.(таблица 4.2);

$K_{пр}$ - коэффициент премирования на производстве, $K_{пр} = 25\%$

Таблица 4.2 – Затраты на заработную плату рабочих

№ п/п	Виды работ при изготовлении вала	Разряд работы	Среднечасовая тарифная ставка, руб.	Норма времени ч.	Тарифная заработная плата, руб.
1	Заготовительные	4	95	10	950
2	Сборочные	4	95	24	2280
3	Испытание	5	100	5	475
Всего					3705

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования:

$$P_{об.пр} = З_{осн} \cdot K_{об} = 4631,25 \cdot 1,8 = 8336,25 \text{ руб.}, \quad (4.3)$$

где $K_{об}$ - коэффициент расходов по содержанию и эксплуатации оборудования; включает затраты на содержание оборудования и рабочих мест, текущий ремонт производственного оборудования и транспортных средств, возмещение износа малоценных быстроизнашивающихся предметов, $K_{об} = 1,8$

Общепроизводственные расходы:

$$Ц_{р.пр} = З_{осн} \cdot K_{ц} = 4631,25 \cdot 2,15 = 9957,19 \text{ руб.}, \quad (4.4)$$

где $K_{ц}$ – коэффициент, учитывающий общезаводский расходы и включает в себя зарплату работников заводоуправления, текущий ремонт и содержание зданий и подготовке кадров. $K_{ц} = 2,15$.

Внепроизводственные расходы:

$$P_{\text{вн}} = C_{\text{общ}} \cdot K_{\text{вн}} = 57723,44 \cdot 0,03 = 1731,7 \text{ руб.}, \quad (4.5)$$

где $K_{\text{вн}}$ - коэффициент, учитывающий внепроизводственные расходы, $K_{\text{вн}} = 3\%$.

$C_{\text{общ}}$ - общезаводская (производственная) себестоимость изделия.

Полная себестоимость:

$$C_{\text{П}} = C_{\text{общ}} + P_{\text{вн}} = 57723,44 + 1731,7 = 59455,14 \text{ руб.}, \quad (4.6)$$

Оптовая цена изделия:

$$П = C_{\text{П}} \cdot K_{\text{из}} = 59455,14 \cdot 0,25 = 14863,8 \text{ руб.}, \quad (4.7)$$

где $П$ – прибыль, включаемая в цену изделия, $K_{\text{из}}$ - нормативный уровень рентабельности изделия; $K_{\text{из}} = 25\%$

$$Ц_{\text{и}} = C_{\text{П}} + П = 59455,14 + 14863,8 = 74318,92 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где $Ц_{\text{и}}$ - оптовая цена изделия.

Вывод: на основе приведенных расчетов можно сделать вывод, что модернизация старого станка путем внедрения в него нового оборудования экономически выгоднее, чем покупка нового станка. Таким образом, расчеты подтверждают экономическую целесообразность проектного варианта.

Заключение

В бакалаврском проекте был разработан лабораторный стенд для исследования трехфазного трансформатора. Для подачи и регулирования напряжения в стенде предусмотрен регулятор напряжения. Для снятия показания стенда в цепь стенда подключается универсальный измерительный прибор K505. Лабораторный стенд предназначен для проведения лабораторных работ тремя студентами. Лабораторный стенд углубляет и закрепляет знания студентов о устройстве и работе трехфазного трансформатора.

В бакалаврской работе были составлены методики лабораторных работ для лабораторного стенда. В число лабораторных работ включаются: исследование групп соединений трехфазного трансформатора, исследование трехфазного двух обмоточного трансформатора по методу холостого хода и короткого замыкания, исследование намагничивания сердечника трансформатора.

В расчетной главе описано проведения опытов короткого замыкания, холостого хода и намагничивая сердечника трехфазного трансформатора. В результате проведения опытов построены характеристики холостого хода и короткого замыкания трансформатора, и осциллограммы токов и напряжений при опыте намагничивания сердечника трансформатора.

Подробно описана техника безопасности по проведению лабораторных работ на лабораторном стенде. Лабораторные работы проводятся тремя студентами под наблюдением лаборанта или преподавателя.

Определена оптовая цена лабораторного стенда, которая составила 74318 руб. Оптовая цена лабораторная стенда вполне конкурентно способна на рынке и будет иметь спрос.

Цели бакалаврской работы считаю достигнуты.

Список использованных источников

1. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. - М.: Высшая школа, 2007. - 607 с.
2. Чечет, Ю.С. Электрические микромашины автоматических устройств / Ю.С. Чечет. – М.: Энергия, 2006. - 125 с.
3. Гольдберг, О.Д. Испытания электрических машин / О.Д. Гольдберг. - М.: Высшая школа, 2008. - 233 с.
4. Борисов, Ю.М. Электрические машины / Ю.М. Борисов. - М.: Энергоатомиздат, 2008. - 360 с.
5. Салов, В.П. Справочник по ремонту, наладке и техническому обслуживанию электрооборудования / В.П. Салов– Л.: Вента-2, 2007. - 187 с.
6. Алиев, И.И. Электротехника и электрооборудование: Справочник: Учебное пособие для вузов / И.И. Алиев. – М.: Высш. шк., 2010. - 1199 с.
7. Костенелец, Н.Ф. Испытание и надежность электрических машин / Н.Ф. Костенелец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 2007. - 212 с.
8. Мартынова, И.О. Электротехника. : Лабораторные-практические работы. Учебное пособие / И.О. Мартынова. - М.: КноРус, 2011. - 136 с.
9. Борисов, Ю.М. Электротехника: учебник. 3-е изд. / Ю.М. Борисов. – СПб.:ВНУ, 2014. – 592 с.
10. Новожилов, О.П. Электротехника и электроника: Учебник для бакалавров / О.П. Новожилов. - М.: Юрайт, 2013. –192 с.
11. Важнов А. И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 2010. - 185 с.
12. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. – М.; Л.: Энергоатомиздат, 2009. - 322 с.
13. Chapman, S. J. Electric Machinery. New York McGraw – Hill, 2010.
14. McPherson, G. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. New York John Wiley & Sons, Inc., 2009.
15. Matsch, L. W. & Morgan, J. D. Electromagnetic and Electromechanical Machines. New York Harper & Row, 2007.

16. Guru, B. S. & Hizioglu, H. R. Electromagnetic Field Theory Fundamentals. Boston PWS Publishing Co., 2006.
17. Brown, D. & Hamilton, E. P., III. Electromechanical Energy Conversion. New York Macmillan, 2008.
18. Del Toro, V. Electric Machines and Power Systems. Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall, Inc., 2007.
19. Nasar, S. A. & Unnewehr, L. E. Electromechanic and Electric Machines. New York John Wiley & Sons, Inc., 2009.
20. Slemon, G. R. & Straughen, A. Electric Machines. Reading, MA Addison Wesley, 2010.
21. Принцип работы трансформатора [Электронный ресурс] /Онлайн-журнал электрика. Режим доступа: <http://elektrica.info/printsip-raboty-transformatora/> (Дата обращения: 18.05.2016)
22. Режим короткого замыкания трансформатора [Электронный ресурс] /Школа для электрика. Режим доступа: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1017-rezhim-korotkogo-zamykaniya.html> (Дата обращения: 15.05.2016)
23. Режимы работы трансформатора [Электронный ресурс] /Онлайн-журнал электрика. Режим доступа: <http://elektrica.info/rezhimy-raboty-transformatora/> (Дата обращения: 14.05.2016)
24. Группы соединения трансформаторов [Электронный ресурс] /Электромеханика. Режим доступа: <http://www.electromechanics.ru/electrical-engineering/special-issues/511-transformer-connection-group.html> (Дата обращения: 14.05.2016)
25. Автотрансформаторы. [Электронный ресурс] /Онлайн-журнал электрика. Режим доступа: <http://elektrica.info/avtotransformatory/> (Дата обращения: 14.05.2016)