

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра систем управления и информационных технологий в строительстве

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Электротехника, электроника и автоматика»
для студентов направления 20.03.02 Природообустройство и водопользование

Воронеж 2021

УДК 621.31
ББК 31.2

Составители:
С.А. Иванов

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника, электроника и автоматика», Методические указания/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: С.А.Иванов. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 45 с.

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника, электроника и автоматика» разрабатывалось на основе требований ФГОС с опорой на научные принципы формирования содержания образования.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле pdf.

Табл. 15., Рис. 17., Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.31
ББК 31.2

Рецензент -

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

1. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и расписавшиеся в соответствующем журнале.

2. Обязательный объем (количество) работ, подлежащих выполнению каждым студентом, и последовательность их выполнения устанавливаются преподавателем.

3. Работы выполняются бригадами в составе 2-3 человек.

4. Все работы выполняются в три этапа.

1 этап – подготовительный. На этом этапе студент должен изучить:

– назначение (цель) работы;

– состав лабораторной установки;

– принцип действия и физический смысл подлежащих экспериментальным исследованиям устройств и явлений;

– назначение и метрологические характеристики используемых в эксперименте измерительных средств (назначение, рабочий диапазон, класс точности, цена деления);

– программу (алгоритм) эксперимента и форму регистрации результатов.

2 этап – выполнение экспериментов. На этом этапе бригады осуществляют необходимую коммутацию на лабораторной установке и после проверки ее преподавателем производят экспериментальные исследования.

По окончании эксперимента результаты в виде записей предъявляются преподавателю.

3 этап – нахождение необходимых величин и зависимостей по полученным при проведении эксперимента данным, построение графиков и оформление отчета. Это этап работы выполняется в оставшееся время лабораторного занятия и в часы, отведенные для самостоятельной работы.

5. Отчетность по проделанной работе производится дважды.

Первый раз устно – после завершения подготовительного этапа. По результатам этого отчета студент, допускается к выполнению следующего этапа работы.

Второй раз письменно – после окончания 3-го этапа, в виде защиты оформленного отчета, по вопросам темы изучаемой в лабораторной работе.

6. Отчет по работе должен содержать:

– изложение цели исследований;

– схему лабораторной установки;

– краткую характеристику основных средств автоматизации и измерительных приборов, входящих в состав установки;

– результаты экспериментов в виде таблиц и диаграмм;

– выводы по результатам исследований (оценку характера полученных зависимостей, предложения по применению исследованных средств в строительстве, применительно к направлению подготовки студента).

7. Таблицы должны оформляться в соответствии с ГОСТ 7.32-2017, п.6.6.

В таблице 1, 2 приведены образцы оформления таблиц.

8. Диаграммы должны оформляться в соответствии с Р 50-77-88.

Образец оформления диаграмм приведен на рис.1.

12. Обозначения физических величин в отчете должны соответствовать ГОСТ

8.417-2002.

10. Отчет по лабораторным работам оформляется каждым студентом индивидуально.

Таблица 1.1 - Зависимость электродвижущей силы E термопары от температуры

П р я м о й х о д		О б р а т н ы й х о д	
Температура, $T^{\circ}\text{C}$	э.д.с. E , мВ	Температура, T , $^{\circ}\text{C}$	э.д.с. E , мВ
10	0,2	45	0,55
25	0,25	50	0,60
30	0,38	55	0,70
35	0,40	60	0,75
40	0,45	65	0,80

Таблица 1.2 - Зависимость силы тока I датчика от перемещения δ

Перемещение, δ , мм	0	0,50	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Сила тока, I , мкА	-100	-83	-66	-41	-22	0,2	25

Примечание: Первая часть номера таблицы соответствует, номеру лабораторной работы, вторая часть - номеру таблицы в этой работе.

Диаграмма изменения во времени температуры
в сушильном шкафу

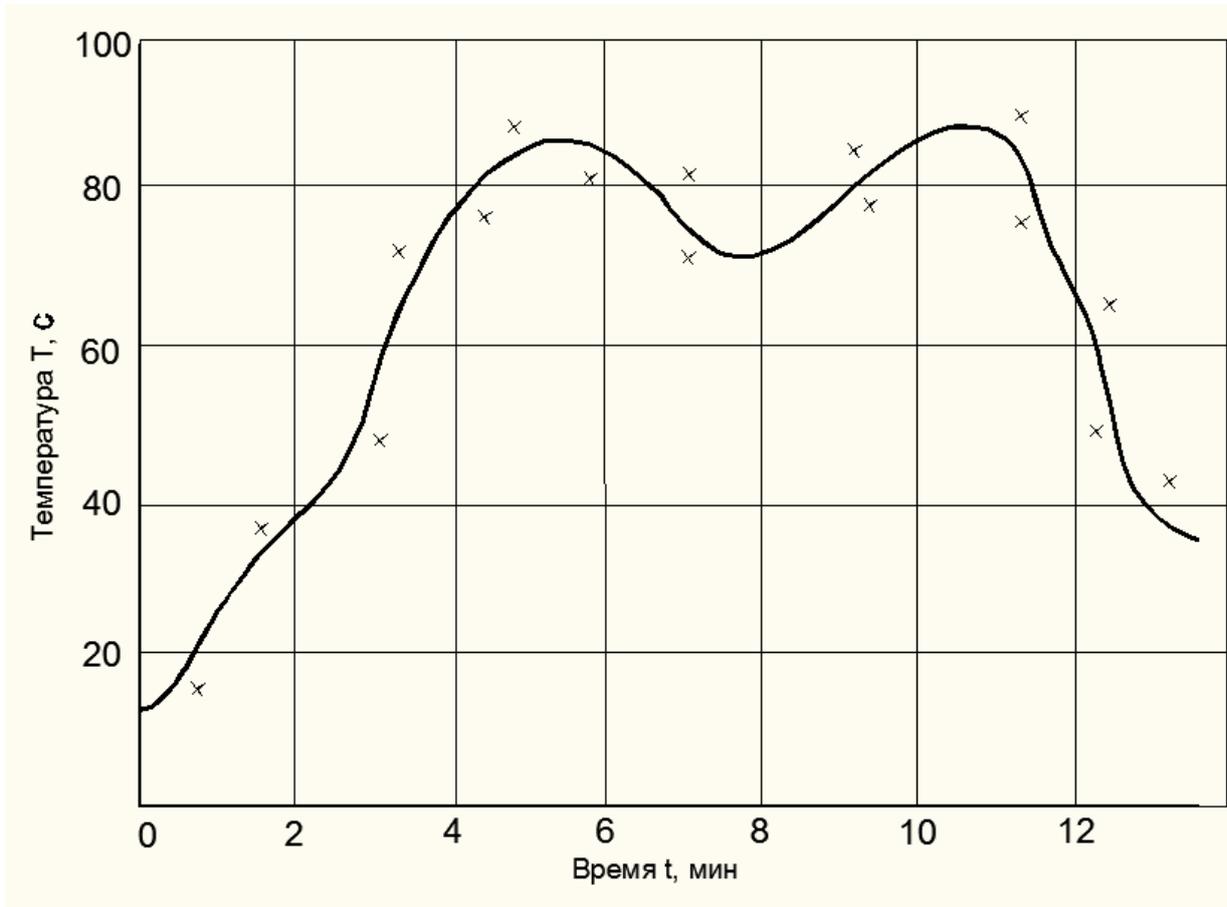


Рис. 1 Образец оформления диаграмм

Лабораторная работа № 1

«ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (ДАТЧИКА)»

Цель работы; ознакомление с конструкцией и принципом действия фотоэлектрического преобразователя, исследование зависимости фототока от светового потока, ознакомление с принципами применения фотоэлектрических преобразователей в различных автоматических системах.

Преобразователи регулируемой или контролируемой величины в выходной сигнал, удобный для дистанционной передачи и дальнейшей обработки, являются необходимым функциональным элементом автоматических систем. Такие преобразователи часто называют датчиками.

Датчик, как правило, осуществляет преобразование измеряемой (входной) физической величины в другую или несколько других физических величин (выходных), или изменяет величину измеряемого параметра.

Основными характеристиками датчиков являются:

– вид функциональной зависимости между изменениями входной x и выходной y величинами $y = f(x)$, предпочтительна линейная зависимость

$$y = sx ;$$

– чувствительность датчика (коэффициент передачи датчика)

$$s = \Delta y / \Delta x ;$$

– порог чувствительности – наименьшее изменение входной величины, вызывающее изменение выходного сигнала;

– инерционность преобразователя – время изменения выходной величины при изменении входной.

Разнообразие датчиков весьма велико. В практических задачах возникает необходимость в контроле многих величин, таких как температура, давление, уровень, расход, механическое перемещение, скорость, усилие и т.д. Разнообразными являются, также и выходные сигналы датчиков (сопротивление, напряжение, ток, давление и т.д.).

В общем случае датчики состоят из одного или нескольких соединенных в единую систему элементарных преобразователей. Важнейшим из них является первичный преобразователь (чувствительный элемент), воспринимающий контролируемую величину. Последующие элементы датчика (при их наличии) могут усиливать сигнал, преобразовывать, модулировать его и т.д.

Датчики в отличие от остальных элементов системы автоматического регулирования и контроля находятся в особо тяжелых условиях эксплуатации, так как устанавливаются непосредственно на объекте регулирования и/или контроля.

Для повышения точности работы датчики часто включаются в специальные схемы: мостовую, компенсационную, дифференциальную и т.д.

Принцип работы фоторезистора

Фоторезистор относится к фотоэлектрическим преобразователям с внутренним фотоэффектом и конструктивно представляет собой (рис 1.1.2а) нанесенный на стеклянную пластину 1 слой полупроводникового материала 2, с которым контактируют электроды 3. При подаче на электроды напряжения U_{cp} через полупроводник потечет ток I_{cp} сила которого зависит от величины светового потока Φ , падающего на светочувствительную поверхность. Объясняется это тем, что, поглощая фотон, электрон приобретает энергию, позволяющую, ему освободиться от внутриаомных связей. Свободные электроны обуславливают электропроводность полупроводника. Чем больше световой поток, тем больше свободных электронов, тем больше электропроводность. Свойства фоторезистора определяются следующими характеристиками:

- оптической – зависимость фототока от оптического потока при постоянном напряжении $I_{\phi} = f(\Phi)$ при $U_{\phi} = const$;
- вольтамперной - зависимость фототока от напряжения при постоянном оптическом потоке $I_{\phi} = f(U_{\phi})$ при $\Phi = const$;
- частотной – зависимость амплитуды колебаний, фототока от частоты модуляции светового потока (характеризует инерционность фоторезистора);
- спектральной – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения.

Основными параметрами фоторезистора являются:

- темновой ток I_T , обусловленный электропроводностью фоторезистора при отсутствии светового потока;
- интегральная чувствительность, равная величине фототока, протекающего по короткозамкнутой цепи фоторезистора, под действием единицы светового потока, переложенного в спектр $K_u = I_{\phi} / \Phi$.

На рис. 1.1.2б приведен пример оптической характеристики фоторезистора. Нелинейность ее обусловлена тем, что, начиная с определенного значения Φ , рост числа свободных электронов замедляется.

На практике фоторезисторы иногда используются в составе фотореле представляющих собой последовательное соединение фоторезистора RBI и электромагнитного реле KI .

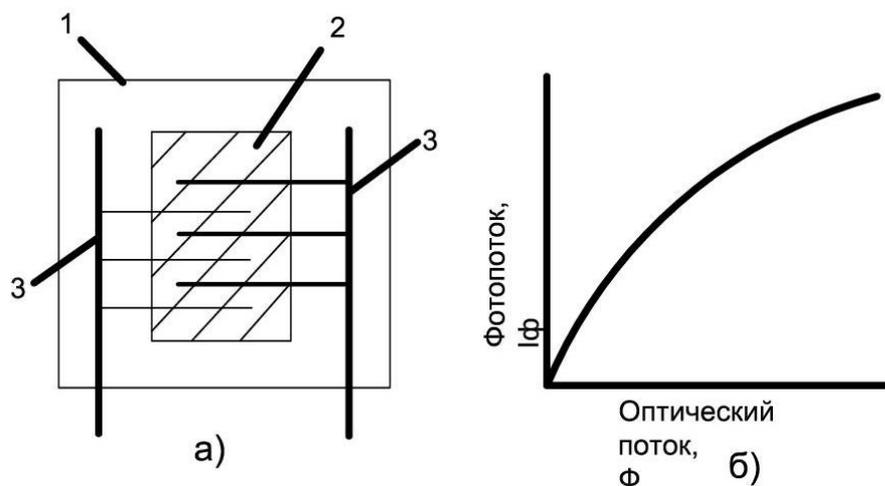


Рис. 1.1. Схема фотоэлектрического преобразования сигналов

Описание лабораторной установки.

Питание схемы лабораторной установки осуществляется от сети переменного тока 220В. Включение питания производится тумблером *SA1*, далее напряжение подаётся через предохранитель *FU*. Контроль подачи напряжения осуществляется сигнальной лампой *HL1*. Поданное на силовой трансформатор *T1* напряжение 220 В понижает до 24 В. Выпрямительный мост, состоящий из диодов *VD1 – VD4*, преобразует переменное напряжение в постоянное необходимое для питания цепей фоторезисторов и реле.

Лабораторная установка состоит из трёх составных части (рис. 1.1.1).

Первая часть схемы предназначена для исследования зависимости фототока I_{cp} от светового потока Φ и состоит из источника излучения – лампы осветительной (накаливания) *EL1*, лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) *T2*, вольтметра *PV*, фоторезистора *RB1*, электромагнитного реле *K1*, миллиамперметра *PA*.

Световой поток Φ , излучаемый осветительной лампой *EL1*, может изменяться с помощью лабораторного автотрансформатора *T2*, изменяющего величину напряжения. Вольтметр *PV* показывает напряжение, подаваемое на осветительную лампу.

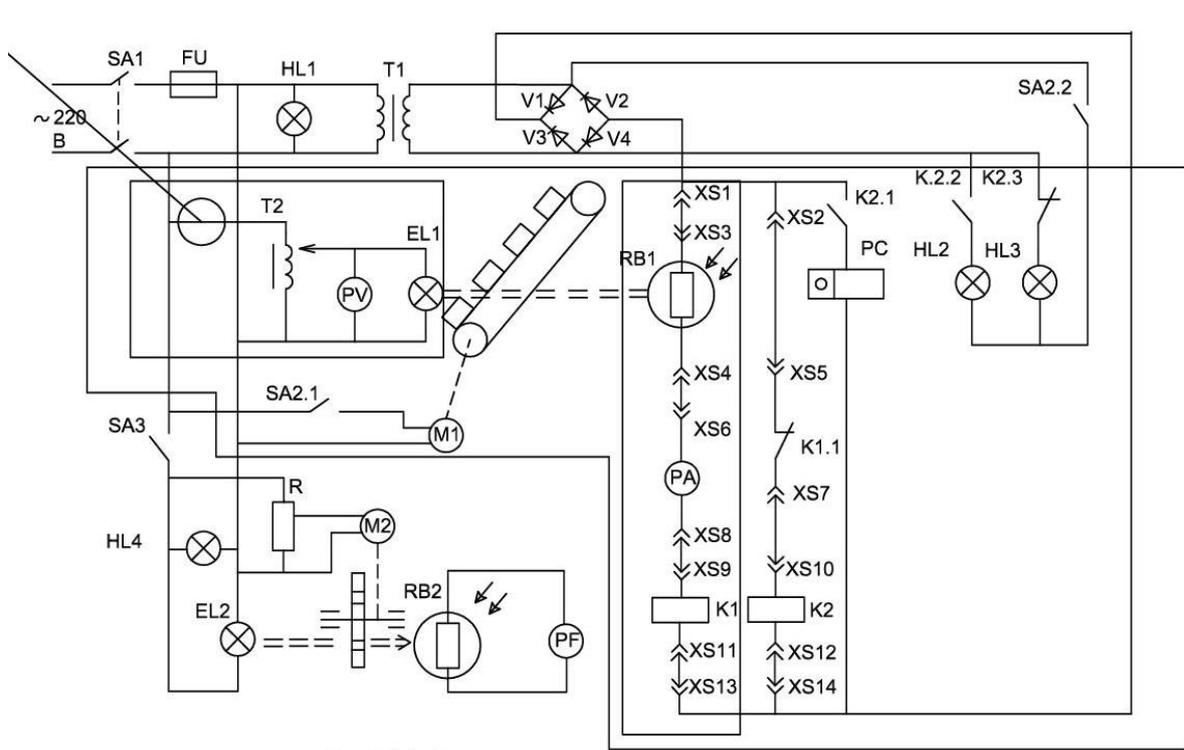


Рис.1.2. Схема лабораторной установки

В цепь фоторезистора включен миллиамперметр PA , позволяющий изменять фототок I_{cp} .

Снятие оптической характеристики заключается в изменении напряжения (с помощью ЛАТР, $T2$), подаваемого на осветительную лампу $EL1$ (контроль по вольтметру PV) и измерении фототока I_{cp} фоторезистора $RB1$ (по миллиамперметру PA).

Вторая часть схемы иллюстрирует возможность применения фотореле для подсчета изделий на конвейере. Она построена на основе предыдущей части и дополняется следующими элементами:

- модель конвейера, на котором расположены кубики, приводится в движение электроприводом $M1$ (включается тумблером $SA2.1$);
- промежуточное реле $K2$, напряжение на катушку которого подается через нормально замкнутый контакт реле $K1.1$.
- электромеханический счетчик импульсов PC , напряжение на который подается через нормально разомкнутый контакт реле $K2.1$;
- сигнальная лампа $HL2$ напряжение на которую подается через нормально разомкнутый контакт реле $K2.2$;
- сигнальная лампа $HL3$ напряжение на которую подается через нормально замкнутый контакт реле $K2.3$.

При работе конвейера расположенные на нем кубики пересекают световой поток, направленный от $EL1$ к $RB1$. Следовательно, световой поток, попадающий на фоторезистор, имеет форму импульсов, что вызывает появление импульсов фототока I_{ϕ} . При отсутствии кубика световой поток попадает на фоторезистор. Под действием возникающего фототока срабатывает реле $K1$, разрывая своими контактами $K1.1$ цепь питания катушки реле $K2$. Когда контакты $K2.1$ разомкнуты, напряжение на счетчик

импульсов не подается. Когда кубик пересекает световой поток, фототок I_{ϕ} уменьшается, напряжение на катушке реле $K1$ уменьшается, контакты этого реле замыкаются, и реле $K2$ срабатывает, замыкая контакты $K2.1$, на счетчик импульсов PC подается напряжение, и счетчик увеличивает показания на единицу.

Третья часть схемы иллюстрирует возможность применения фоторезистора для измерения частоты вращения электродвигателя.

В состав схемы входят следующие элементы:

– электродвигатель $M2$, напряжение на который подается тумблером $SA3$ и регулируется переменным резистором R . На валу электродвигателя находится диск с отверстиями;

– источник излучения – осветительная (накаливания) лампа $EL2$, расположенная перед диском;

– фоторезистор $RB2$, расположенный по другую сторону диска таким образом, чтобы оптическое излучение от $EL2$ через отверстие в диске попадало на светочувствительную поверхность;

– частотомер PE .

При включении электродвигателя $M2$ (загорается сигнальная лампа $HL4$) диск с отверстиями начинает вращаться и осуществляет импульсную модуляцию светового потока, поступающего на $RB2$. Импульсы фототока подаются на частотомер PF . Измерив частоту следования импульсов, можно определить частоту вращения электродвигателя:

$$n = \frac{m}{k} \left[\frac{од}{с} \right]$$

где: m – показание частотомера в Гц;

k – число отверстий в диске.

Рабочее задание:

1. Снять оптическую характеристику фоторезистора, для чего:

– проверить исходное состояние органов управления (тумблеры $SA1$, $SA2$ и $SA3$ в положение «включено», ручки автотрансформатора и переменного резистора R повернуть против часовой стрелки до упора);

– произвести коммутацию цепей фоторезистора и реле, соединив имеющимися на рабочем месте проводами гнезда $XS1$ - $XS12$ в соответствии со схемой лабораторной установки;

– после подачи напряжения на лабораторную установку перевести тумблер $SA1$ в положение «включено» (сигнальная лампа $HL1$ светится);

– увеличивая с помощью ЛАТР напряжение, подаваемое на лампу $EL1$, от 0 до 250 В, (контроль по вольтметру PV), через каждые 10 В, замерять соответствующий фототок по миллиамперметру PA отметив, при каком напряжении срабатывает реле $K1$ (по щелчку);

– уменьшая с помощью ЛАТР напряжение, подаваемое на лампу $EL1$, от 250 до 0 В, (контроль по вольтметру PV), через каждые 10 В, замерять соответствующий фототок по миллиамперметру PA отметив, при каком напряжении произойдет отпускание реле $K1$ (по щелчку);

- перевести орган управления в исходное состояние;
- заполнить таблицу зависимости фототока I_Φ от напряжения U_{EL1} подаваемого на лампы $EL1$ и светового потока Φ ;
- построить график зависимости $I_\Phi = f(\Phi U_{EL1})$, отметив точки срабатывания и отпускания реле $K1$.

2. Познакомится с возможностью использования фотореле для счета изделий, для чего:

- перевести тумблер $SA1$ в положение «включено»;
- с помощью автотрансформатора $T2$ установить на лампе $EL1$ напряжение, обеспечивающее надежное срабатывание реле $K1$ (использовать для этого график зависимости $I_\Phi = f(\Phi U_{EL1})$, полученный в п.1);
- сбросить показания счетчика PC ;
- перевести тумблер $SA2.1$ в положение «включено», при этом начнёт работать модель конвейера, счетчик PC начнет считать проходящие мимо фоторезистора кубики, сигнальные лампы $HL2$ и $HL3$ начнут поочередно включаться;
- пересчитать количество кубиков, прошедших мимо фоторезистора за какой-либо отрезок времени, и сравнить это количество с показаниями счетчика;
- перевести орган управления в исходное состояние.

3. Познакомится с возможностью использования фоторезистора для измерения, частоты вращения электродвигателя, для чего:

- перевести в положение «включено» тумблер $SA1$, включить и подготовить к работе частотомер PE (в соответствии с имеющейся на рабочем месте инструкцией);
- перевести в положение «включено» тумблер $SA3$;
- изменяя с помощью переменного резистора R напряжение, подаваемое на электродвигатель $M2$, определить для нескольких точек частоту вращения электродвигателя;
- привести схему в исходное состояние.

Вопросы для самопроверки

1. Назначение фотоэлектрических, преобразователей.
2. Конструкция и принцип действия фоторезистора.
3. Состав и принцип действия фотореле.
4. Характеристики определяющие свойства фоторезистора.
5. Назначение лампы $EL1$.
6. Каким образом регулируется световой поток, излучаемый лампой $EL1$?
7. Принцип действия схемы счета изделий с помощью фоторезистора.
8. Принцип действия схемы измерения частоты вращения электродвигателя, с помощью фоторезистора.
9. Приведите примеры возможного использования фотоэлектрических преобразователей применительно к Вашему направлению подготовки.

Лабораторная работа № 2

«ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОСТАТНОГО И ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (ДАТЧИКА)»

Исследование реостатного и индуктивного преобразователей (датчиков).

Цель работы: ознакомление с областями применения, принципом действия и основными характеристиками реостатного и индуктивного преобразователей (датчиков).

Описание лабораторной установки. Объектом изучения и исследования в лабораторной установке являются реостатный и индуктивный преобразователи (рис.2.1).

Реостатный преобразователь (рис.2.1а) состоит из трубчатого каркаса **1**, выполненного из изоляционного материала (керамики и т.д.). На каркас намотана изолированная проволока **2** с высоким удельным сопротивлением. С одной стороны изоляция с проволоки снята для осуществления контакта со щеткой **3**, перемещающейся вдоль каркаса.

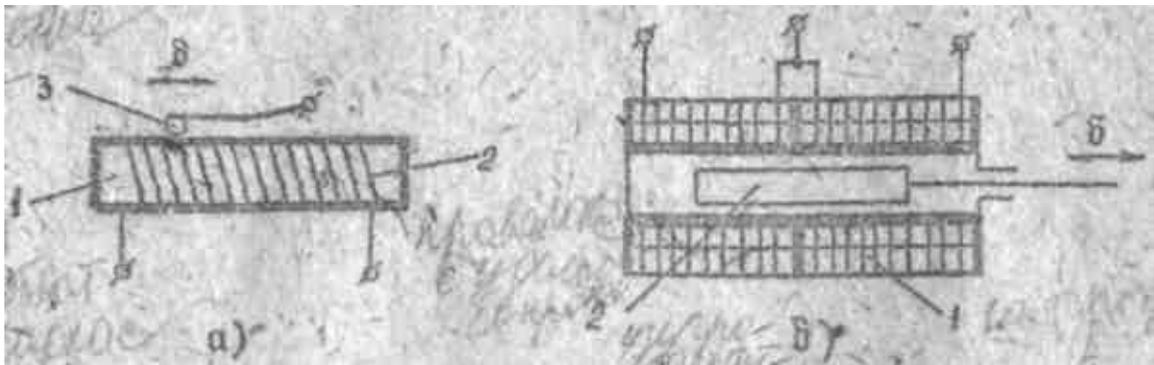


Рис. 2.1. Схема реостатного и индуктивного преобразователя

При перемещении щетки **3** на некоторую величину $\Delta\delta$ относительно ее исходного положения приращение сопротивления составит

$$\Delta R = R_n \frac{\Delta\delta}{\delta_n}$$

где: R_n – полное сопротивление обмотки преобразователя;

$\Delta\delta$ – полное перемещение щетки.

Чувствительность (коэффициент передачи) реостатного преобразователя

$$K_{pn} = \frac{R_n}{\delta_n}$$

Индуктивный датчик (рис. 2.1б) состоит из корпуса, изготовленного из

ферромагнитного материала. Внутри корпуса размещена катушка индуктивности I , состоящая из двух секций. Секции подключены встречно. Внутри катушки находится ферромагнитный сердечник 2 в исходном положении расположенный симметрично относительно секций. При смещении сердечника на величину $\Delta\delta$ индуктивность одной секции увеличивается, а другой – уменьшается на такую же величину.

Полное приращение индуктивности

$$\Delta L = 2 \frac{\omega^2}{l^2} r_c^2 (\mu - 1) \Delta\delta$$

где: ω – число витков секции;

l – длина секции;

r_c – радиус сердечника;

μ – магнитная проницаемость, сердечника.

Чувствительность (коэффициент передачи) индуктивного преобразователя

$$K_{un} = 2 \frac{\omega^2}{l^2} r_c^2 (\mu - 1)$$

Непосредственно из формул для чувствительности преобразователей видно, от каких конструктивных, параметров зависит чувствительность рассматриваемых устройств.

Таким образом, в рассматриваемых преобразователях изменение сопротивления и индуктивности зависит от механического перемещения щетки и сердечника. Это предопределяет основное применение этих устройств – преобразование линейного механического перемещения в электрические величины, удобные для дальнейшего использования (измерения, передачи на расстояние). При этом линейное перемещение может быть связано с изменением длины, толщины, уровня, качества поверхности, силы, давления, с износом, вибрацией, деформацией, т.е. области применения реостатного и индуктивного преобразователей чрезвычайно разнообразны.

На практике обычно измеряют не сопротивление и индуктивности, которые зависят от выходного механического перемещения, а токи и напряжения, которые являются функциями изменяющихся сопротивлений и индуктивностей. Это упрощает измерительные схемы.

Для повышения чувствительности преобразовательных схем и их помехозащищенности реостатные и индуктивные преобразователи включают в мостовые схемы - кольцевые цепи из четырех сопротивлений («плечи» моста), в которых источник питания и показывающий измерительный прибор, подключены диагонально, к противоположным вершинам, в виде «мостов».

В мостовой схеме легко выявить направление изменения входной величины. Если мост уравновешен, то изменение направления движения щетки в реостатном преобразователе или сердечника в индуктивном преобразователе приводит к изменению знака (фазы) сигнала в измерительной диагонали, что выявляется измерительным прибором, имеющим нулевую отметку в центре шкалы.

Схема включения реостатного датчика приведена на рис.2.2.

Напряжение сети через понижающий трансформатор $T1$ поступает на выпрямительный мост, собранный на диодах $V1 - V4$. Постоянным напряжением с выхода выпрямительного моста питается, измерительный мост, образованный резисторами $R1 R2$, а также реостатным датчиком B . При перемещении щетки датчика B изменяется ток в диагонали моста, который измеряется прибором $PA2$. Перемещение щетки осуществляется

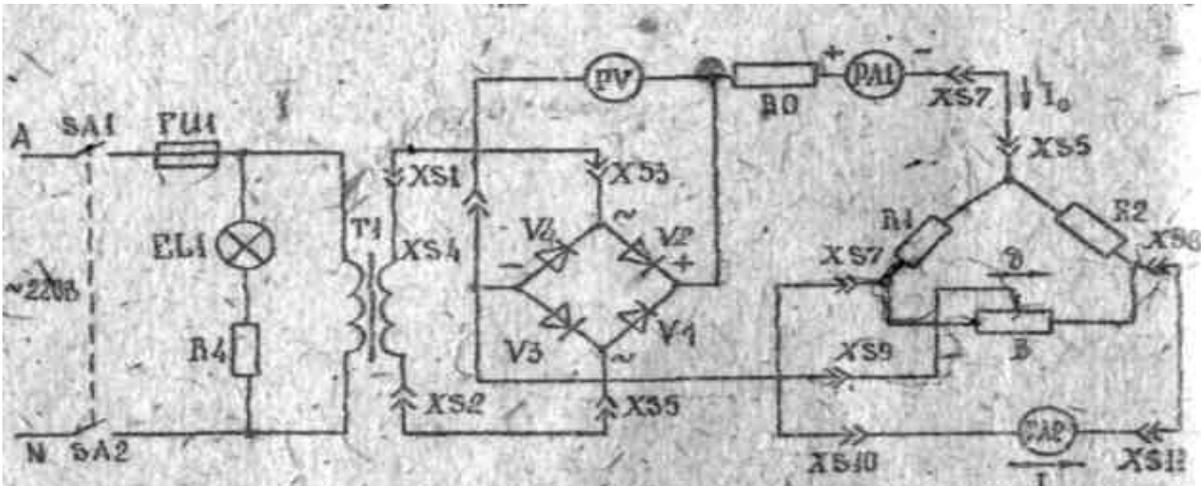


Рис. 1.2.2. Схема включения реостатного датчика

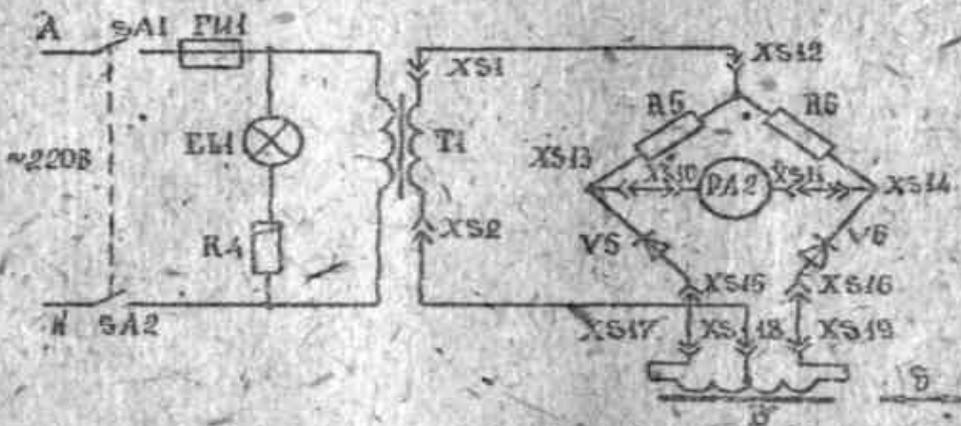


Рис. 1.2.3. Схема включения индуктивного датчика

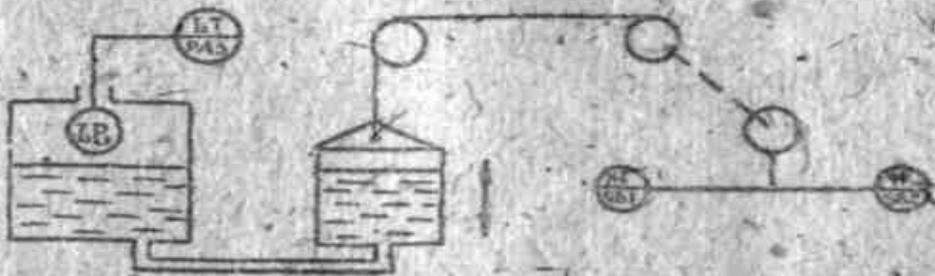


Рис. 1.2.4. Схема использования реостатного датчика в качестве вторичного преобразователя

микрометрическим винтом, который моделирует перемещение, возникающее в

системах контроля, управления, сигнализации и т.д. Приборы и контролируют напряжение и ток на диагонали питания измерительного моста.

Схема включения индуктивного датчика приведена на рис.2.3.

Напряжение сети через понижающий трансформатор *T1* подается на измерительный мост, образованный резисторами *R5*, *R6* и секциями индуктивного датчика *B*. При перемещении сердечника изменяется ток в диагонали моста, который измеряется прибором *PA2*. Перемещение сердечника осуществляется микрометрическим винтом. Диоды *V5* и *V6* позволяют пользоваться прибором постоянного тока.

Рис.1.2.4 иллюстрирует применение реостатного датчика в качестве вторичного преобразователя. За счет изменения взаимного положения двух сосудов, изменяется уровень жидкости в одном из них. Поплавковый датчик уровня кинематически связан с щеткой реостатного датчика, от перемещения которой зависят показания измерительного прибора *PA3*. Изменение взаимного положения сосудов осуществляется электроприводом, включаемым кнопочными элементами *H* (*SB1* и *SB2*).

Рабочее задание.

1. Снять зависимость выходного электрического сигнала (тока в диагонали мостовой схемы от механического перемещения щетки реостатного преобразователя. Для этого необходимо:

- произвести коммутацию схемы в соответствии с рис. 2.2;
- изменяя положение щетки микрометрическим винтом, измерить соответствующие значения электрического тока прибором *PA2*;
- построить в прямоугольной системе координат зависимость электрического тока от механического перемещения щетки реостатного датчика и определить чувствительность (коэффициент передачи) мостовой измерительной схемы.

2. Снять зависимости выходного электрического сигнала (тока в диагонали мостовой схемы) от перемещения сердечника индуктивного преобразователя. Для этого необходимо:

- произвести коммутацию схемы в соответствии с рис.2.3;
- изменяя положение сердечника индуктивного преобразователя микрометрическим винтом, измерить соответствующие значение электрического тока прибором *PA2*;
- построить в прямоугольной системе координат зависимость электрического тока от механического перемещения сердечника индуктивного преобразователя и определить чувствительность (коэффициент передачи) мостовой измерительной схемы, элементом которой является исследуемый преобразователь.

3. Изменяя уровень жидкости в емкости (рис.2.4), снять зависимость между изменением уровня жидкости и показаниями измерительного прибора *PA3*.

Вопросы для самопроверки

1. Области применения реостатных и индуктивных преобразователей.

2. Конструктивное выполнение реостатных и индуктивных преобразователей.
3. Схемы включения преобразователей.
4. Основные характеристики преобразователей как элементов автоматической системы.

Лабораторная работа № 3

«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ»

Цель работы

Ознакомиться с устройством стендов ЛЭС-5, СОЭ-1 и БИС и их измерительных приборов. Изучить способы основных электрических измерений напряжения, тока, сопротивления и мощности, освоить методику обработки результатов измерений.

Задание по работе

1. Ознакомиться с электрооборудованием стендов ЛЭС-5, СОЭ-1 и БИС.
2. Изучить устройство магнитоэлектрических, электромагнитных и электродинамических измерительных приборов.
3. Освоить практическую методику прямых и косвенных измерений электрических величин.
4. Зная паспортные данные используемых приборов, оценить точность возможных измерений.
5. Используя полученные экспериментальные данные, рассчитать параметры отдельных элементов стенда ЛЭС-5.
6. Освоить методику и построить заданные в работе графики изменения электрических величин.

Основные теоретические положения

При изучении принципов работы измерительных приборов стенда ЛЭС-5 и СОЭ-1 следует знать, что электромеханические измерительные приборы состоят из электромагнитного устройства той или иной системы и измерительного преобразователя. В частности, для вольтметров и амперметров преобразователями являются добавочные резисторы и шунты.

Приборы магнитоэлектрической системы предназначены для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока. Они измеряют среднее значение электрической величины.

Принцип действия магнитоэлектрических приборов основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с измеряемым током, который протекает по виткам подвижной катушки. Вращающий момент, возникающий при этом, пропорционален измеряемому току и индукции магнитного поля. Повороту рамки противодействует момент, создаваемый спиральными пружинами, который пропорционален их углу закручивания. Установившееся положение подвижной части определяет равенство вращающего и противодействующего моментов, а угол ее отклонения соответствует току, протекающему по катушке приборов.

Приборы электромагнитной системы предназначены для измерения тока и напряжения как в цепях постоянного, так и переменного токов. Они измеряют действующее значение электрических величин. Эти приборы состоят из неподвижной катушки, по виткам которой протекает измеряемый ток, и сердечника, выполненного из ферромагнитного материала. Под воздействием магнитного поля катушки сердечник втягивается в нее, что вызывает поворот стрелки прибора. Перемещению сердечника противодействуют спиральные пружины.

Принцип работы электродинамических приборов основан на взаимодействии магнитных полей двух токов, протекающих в различных катушках. Одна из этих катушек неподвижна, а вторая расположена внутри первой и вращается на оси.

В подвижную катушку ток подводится через спиральные пружины, которые одновременно служат для создания противодействующего момента.

Электродинамические приборы служат для измерения тока, напряжения и мощности в цепях постоянного и переменного тока.

Учитывая специфику взаимодействия подвижной и неподвижной систем измерительных приборов, зависимость между углом поворота стрелки и измеряемой величины носит различный характер (табл. 3.1.).

Таблица 3.1

Уравнения шкал приборов различных систем

С и с т е м а	Уравнение шкалы
Магнитоэлектрическая	$L = S_i \cdot I_0; \quad L = S_u \cdot U_0$
Электромагнитная	$L = S_i \cdot I^2; \quad L = S_u \cdot U^2$
Электродинамическая и ферродинамическая	$L = S_i \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi$

В зависимости от системы прибора их шкалы могут быть либо линейными, либо нелинейными (равномерными и неравномерными).

В этих уравнениях:

L - линейное или угловое перемещение указателя(стрелки);

S_i - коэффициент чувствительности по току;

S_u - коэффициент чувствительности по напряжению;

I_0, U_0 - постоянные составляющие тока и напряжения;

I, U - действующие (среднеквадратическое) значения тока и напряжения;

I_1, I_2 - действующее значение токов в первой и второй катушках механизма;

φ - фазовый сдвиг между токами в катушках.

Измеренные значения тока, напряжения и мощности определяются по формуле:

$$A_{и} = C \cdot a, \quad (3.1)$$

где a - показания по шкале прибора;

C - цена деления.

Цена деления амперметра и вольтметра находятся из выражения:

$$C = A_k / N, \quad (3.2)$$

где A_k - установленный предел измерения тока или напряжения;

N - число делений всей шкалы.

Цена деления ваттметра определяется по формуле:

$$C = U_k I_k / N, \quad (3.3)$$

где U_k, I_k - выбранные пределы измерения по напряжению, току.

Паспортные данные измерительных приборов обычно приводятся на их шкалах.

Расшифровка этих данных приведена в табл. 1.2.

Пользуясь различными измерительными приборами, следует помнить, что измерения разделяют на прямые и косвенные.

Прямые измерения – это такие, когда результат измерения непосредственно дает искомое значение исследуемой величины. Например, измерение напряжения в электрических цепях вольтметром. К косвенным относят такие измерения, когда искомую величину определяют исходя из результата нескольких прямых измерений других физических величин.

Например, измерение сопротивления и мощности в цепи с помощью амперметра и вольтметра. Точность измерения характеризуется возможными погрешностями, которые подразделяются на относительные и абсолютные, основные и дополнительные.

Абсолютная погрешность измерения:

$$\Delta A = A - A_0, \quad (3.4)$$

где A - результат измерения;

A_0 - истинное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A_0}, \quad (3.5)$$

Относительную погрешность часто выражают в процентах, т.е. в этих формулах следует ввести множитель $\times 100\%$. При прямых измерениях относительную погрешность определяют по классу точности прибора.

Таблица 3.2

Условные обозначения на шкалах измерительных приборов

Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
Электромагнитный прибор	
Электромагнитный поляризованный прибор	
Электродинамический прибор	
Ферродинамический прибор	
Индукционный прибор	
Электростатический прибор	
Тепловой прибор (с нагреваемой проволокой)	

Класс точности - характеристика прибора, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей. Дополнительная погрешность возникает при условиях отличных от нормальных. Классы точности приборов условно обозначаются числами из ряда (0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6), где h - целые положительные и отрицательные числа.

Чаще всего класс точности обозначен числом K без подчеркивания уголком или помещения в кружок. В этом случае предел допустимой основной погрешности определяется формулой:

$$\Delta A_{\text{и}} = \pm \frac{K \cdot A_{\text{к}}}{100}, \quad (3.6)$$

Учитывая вышеизложенное, следует помнить, что, используя многопредельные электроизмерительные приборы, предел измерения следует выбирать, переходя от максимального значения к необходимому, из условия наибольшего возможного угла отклонения стрелки прибора, что будет сопровождаться наименьшей относительной погрешностью.

Погрешности косвенных измерений определяются исходя из следующих положений.

Пусть измеряемая величина y связана с величинами x_1, x_2, \dots, x_n , измеряемыми прямым способом, зависимостью:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3.7)$$

Абсолютная погрешность измерения величины y вычисляется по формуле:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \left| \frac{df(x_1, x_2, \dots, x_n)}{dx_i} \cdot \Delta x_i \right|, \quad (3.8)$$

где Δx_i - абсолютная погрешность прямых измерений, определяемых по классу точности приборов.

Относительная погрешность рассчитывается по формуле

$$\delta Y = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{df(x_1, x_2, \dots, x_n)}{dx_i} \cdot \Delta x_i \right|}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}, \quad (3.9)$$

При построении графиков по экспериментальным данным можно пользоваться простым способом, представленным на рис.1.1.

Экспериментальные точки с координатами x , y при выбранных масштабах по осям Ox и Oy наносятся на лист бумаги. Далее они мысленно соединяются прямыми линиями и после этого проводится кривая таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n S'_i, \quad (3.10)$$

где S_i и S'_i - площади между проведенной кривой и ломаной линией выше и ниже кривой.

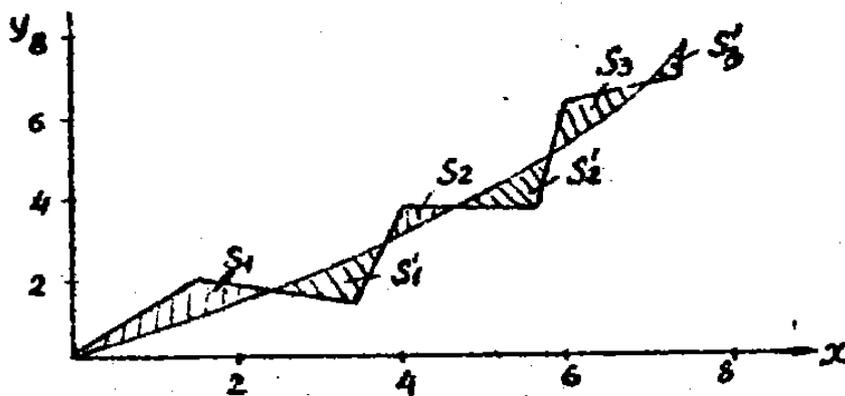


Рис.3.1. Построение графика по экспериментальным точкам

Порядок выполнения лабораторной работы и обработки результатов измерений.

1. По заданию преподавателя запишите в виде таблицы характеристики

измерительных приборов стенда: назначение прибора; система; заводской номер; класс точности; пределы измерений; внутреннее сопротивление; диапазоны рабочих частот; шкала прибора; цена делений.

2. Включите стенд и проведите измерения напряжений источников питания стенда U_1, U_2, U_3 . Вычислите погрешности измерений.

Результаты измерений занесите в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты измерений напряжений

Напряжения источника питания, В	Предел измерения, ПИ	показания по шкале прибора	число делений всей шкалы	Цена деления	Измеренное значение	Класс точности	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
U_1								
U_2								
U_3								

3. Собрать схему, изображенную на рис.1.2. В качестве R_x берутся сопротивления вначале R_3 , а затем R_4 .

Снимите показания приборов в 2-х опытах и занесите их в табл.3.4.

Используя законы Ома и Кирхгофа, вычислите неизвестные величины R_x и внутреннее сопротивление R_0 источника U_3 .

Вычислите прямую и косвенную погрешности.

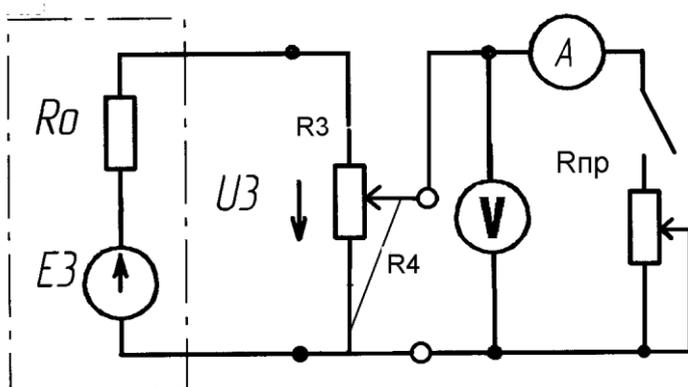


Рис.3.2. Схема измерения сопротивлений косвенным методом

Таблица 3.4

Результаты измерений сопротивлений

Сопротивления	Измерено				Вычислено								
	изм	И	изм	И	I	I	U	U	x	R _x	R _x	0	
R ₃													
R ₄													

4. Собрать схему в соответствии с рис.3.3 для измерения тока, напряжения и мощности.

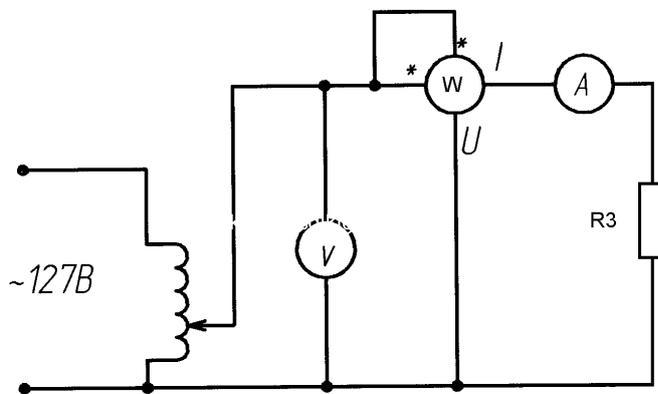


Рис.1.3. Схема для измерения тока, напряжения и мощности в цепи переменного тока

Установить ручку регулирования напряжения на ЛАТРе в нулевое положение. Подключить собранную схему к источнику переменного напряжения.

С помощью ЛАТРа, изменяя величину тока в цепи от минимального значения 0,2 А до максимального 1 А, снять показания приборов в пяти точках и занести их в табл.3.5.

Проведите необходимые вычисления и также занесите их в ту же таблицу.

Постройте графики зависимостей $U = f(I)$; $P = f(I)$.

Таблица 3.5

Измеренные и вычисленные значения мощности, тока и напряжения

Измерено						Вычислено								
						Прямые измерения						Косвенные измерения		
I	ПИ	U	ПИ	P	ПИ	ΔI	δI	ΔU	δU	ΔP	δP	P	$\frac{\delta P}{P}$	$\frac{\Delta P}{P}$

5. При расчете неизвестных величин в табл.3.3, 3.4, 3.5 можно использовать следующие зависимости:

- относительная погрешность прямого измерения:

$$\delta A = \Delta A_{и} / A_{и} , \quad (3.11)$$

где $\Delta A_{и}$ - абсолютная погрешность прибора определяется классом точности;
 $A_{и}$ - результат измерения.

- относительная погрешность при **косвенном измерении** мощности и сопротивления рассчитывается по формуле:

$$\delta P = \delta R = \frac{\Delta U_{и}}{U_{и}} + \frac{\Delta I_{и}}{I_{и}} \quad (3.12)$$

где $U_{и}$ и $I_{и}$ - показания вольтметра и амперметра;

$\Delta U_{и}$ и $\Delta I_{и}$ - абсолютные погрешности прямых измерений.

Абсолютные погрешности при этом равны:

$$\Delta P = \delta P \cdot P_{и} ; \quad \Delta R = \delta R \cdot R_{и} , \quad (3.13)$$

где $P_{и}$ и $R_{и}$ - измеренные значения мощности и сопротивления.

Внутреннее сопротивление R_0 определяется на основании 2-го закона Кирхгофа.

В результате

$$R_0 = \frac{(U_4 - U_3)}{(I_3 - I_4)}, \quad (3.14)$$

где U_3 и U_4 - значения соответствующих напряжений;

I_3 и I_4 - токов, полученных при измерении сопротивлений R_3 и R_4 .

Контрольные вопросы

1. Что такое класс точности прибора и как он обозначается?
2. Как найти абсолютную погрешность прямого измерения напряжения, тока и мощности?
3. Как найти относительную погрешность прямого измерения?
4. Как найти цену деления амперметра, ваттметра и вольтметра?
5. Что такое косвенное измерение?
6. Выведите формулы для вычисления абсолютных и относительных погрешностей косвенных измерений сопротивлений и мощностей?
7. Как определить косвенным методом значение сопротивления?
8. Как определить значение мощности, измеренное косвенным методом в схеме рис.1.2?
9. Как построить график по экспериментальным данным?
10. В чём измеряется напряжение, сила тока, сопротивление, мощность.

Лабораторная работа № 4

«ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА»

Цель работы

Исследование электрического состояния и фазовых соотношений в неразветвленных электрических цепях переменного тока, содержащих реактивные приемники энергии. Ознакомление с явлением резонанса напряжений.

Освоение способов расчета неразветвленной электрической цепи переменного тока.

Задание по работе

1. Ознакомиться с электрической схемой лабораторной установки. Записать паспортные данные измерительных приборов, катушки индуктивности и диапазон изменения емкости блока конденсаторов, входящих в состав лабораторной установки.

2. Провести расчеты изменения тока при неизменном напряжении для цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки индуктивности и блока конденсаторов при различных 7-ми значениях емкости, включая точку резонанса напряжения.

3. Построить расчетные зависимости изменения тока, $\cos \varphi$, напряжения на емкости и индуктивности от величины емкости конденсатора.

4. Провести экспериментальные исследования неразветвленной цепи переменного тока, состоящей из катушки индуктивности и блока конденсаторов.

5. Провести необходимые расчеты и нанести экспериментальные результаты на теоретические графики, полученные в пункте 3.

Основные теоретические положения

Примером неразветвленной цепи переменного синусоидального тока может служить схема на рис.3.1.

Она состоит из последовательно соединенных индуктивной катушки с активным сопротивлением R и индуктивностью L и конденсатора C .

Активное сопротивление R характеризует необратимый процесс преобразования энергии, а индуктивность L и емкость C - обратимый процесс преобразования энергий электромагнитного и электрического полей.

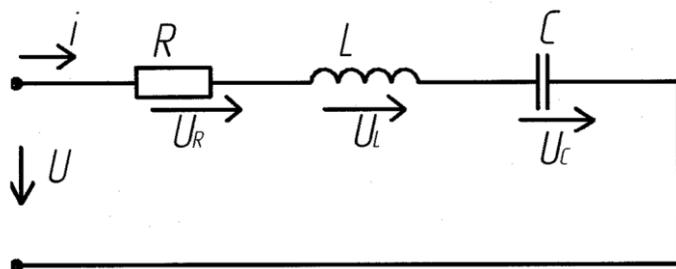


Рис.4.1. Электрическая цепь из последовательно соединенных R , L и C

Предположим, что к зажимам цепи приложено напряжение, изменяющееся по закону

$$U = U_m \cdot \sin \omega t . \quad (4.1)$$

Тогда возникший ток в цепи создаст падение напряжения: на активном элементе

$$U_R = iR ; \quad (4.2)$$

на индуктивном

$$U_L = -e_L = L \frac{di}{dt}; \quad (4.3)$$

на емкостном

$$U_C = Q/C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt; \quad (4.4)$$

где ω - угловая скорость, U_m - амплитудное значение напряжения, t - время, e_L - э.д.с. самоиндукции, Q - заряд на конденсаторе.

На основании второго закона Кирхгофа для цепи, изображенной на рис.4.1 запишем уравнение с учетом выражений (4.1)-(4.4).

$$i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i \cdot dt = U_m \cdot \sin \omega t. \quad (34.5)$$

В [2] показано, что формула (4.1) может быть изображена комплексным числом $\dot{U}_m \cdot e^{j\omega t}$, ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ - комплексным числом $\dot{I}_m e^{j\omega t}$, выражение (4.3) - комплексным числом $j\omega L \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t}$, а (4.4) - $(1/j\omega C) \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t}$. С учетом записанного выше уравнение (4.5) приводится к виду

$$R \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t} + j\omega L \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t} + \frac{\dot{I}_m \cdot e^{j\omega t}}{j\omega C} = \dot{U}_m \cdot e^{j\omega t}, \quad (4.6)$$

откуда получаем, что

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{R + j \cdot \omega L - j \frac{1}{\omega C}}. \quad (4.7)$$

Величины $X_L = \omega \cdot L$; $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ имеют размерность сопротивления и называются соответственно *индуктивным и емкостным сопротивлением*.

Величина

$$\underline{Z} = R + j \cdot (X_L - X_C), \quad (4.8)$$

называется *полным комплексным сопротивлением*.

Переходя к действующим значениям тока и напряжения, уравнение (4.7) с учетом (4.8) принимает вид

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{(R + j \cdot (X_L - X_C))} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}. \quad (4.9)$$

Особый интерес представляет случай, когда

$$X_L = X_C, \quad (4.10)$$

который называется *резонансом напряжения*, при этом U_L по величине может значительно превышать напряжение питания цепи

$$\dot{U}_L = -\dot{U}_C = j \frac{X_L}{R} \dot{U}. \quad (4.11)$$

В этом случае сама цепь носит активный характер, т.к.

$$\cos \varphi = R / \underline{Z} = R / \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 1. \quad (4.12)$$

Полная мощность в комплексном виде, потребляемая цепью, определяется формулой

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \hat{I} = \underline{S} e^{j\varphi} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi, \quad (4.13)$$

где \hat{I} - сопряженный комплекс тока;

$\underline{S} = \dot{U} \cdot \hat{I}$ - полная мощность, измеряемая в ВА ;

$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$ - угол сдвига между векторами тока и напряжения.

Величина полной мощности S может быть определена из треугольника мощностей как:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (4.14)$$

где $P = S \cos \varphi$ - активная мощность, Вт;

$Q = S \sin \varphi$ - реактивная мощность, Вар;

$\cos \varphi$ - называется *коэффициентом мощности* (чем выше $\cos \varphi$, тем большая доля полной мощности преобразуется в активную мощность).

3.4. Порядок выполнения работы

1. Запишите технические характеристики приборов и оборудования исследуемой схемы, представленной на рис.4.2.

2. Используя исходные данные катушки индуктивности и блока конденсаторов,

проведите необходимые расчеты параметров элементов схемы, представленной на рис.4.2. Результаты занесите в табл.4.1.

При проведении расчетов следует принимать ток в цепь $I = 1\text{A}$ в точке резонанса $X_L = X_C$, при этом определять значение напряжения питания цепи для всех семи опытов.

3. Постройте графики зависимостей $I = f(C)$; $\cos \varphi = f(c)$; $U_C = f(C)$; $U_L = f(C)$.

4. Соберите схему, изображенную на рис.4.2., с использованием необходимых приборов, принимая во внимание результаты расчета по пункту 2.

Получите разрешение на включение стенда.

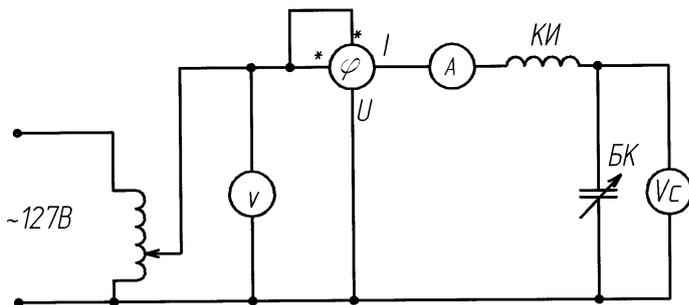


Рис. 4.2. Схема для исследования явления резонанса:
КИ - катушка индуктивности; БК - блок конденсаторов

Таблица 4.1

Результаты расчета электрической цепи

Номер опыта	Характер нагрузки	Параметры катушки		Параметры конденсатора		Рассчитанные величины					
		R, Ом	X_L , Ом	C, мкФ	X_C , Ом	Z, Ом	I, А	U, В	$\cos \varphi$	U_L , В	U_C , В
1.	$X_L \ll X_C$										
2.	$X_L \ll X_C$										
3.	$X_L \ll X_C$										
4.	$X_L = X_C$										
5.	$X_L \gg X_C$										
6.	$X_L \gg X_C$										
7.	$X \gg X_C$										

5. Установите с помощью переключателей величину емкости C , соответствующую точке резонанса $X_L = X_C$.

Установите ЛАТР в «нулевое» положение, включите схему и при помощи ЛАТРа установите ток в цепи, равный 1А, зафиксировав при этом напряжение питания цепи U , которое в последующих опытах поддерживать неизменным.

Снимите показания приборов, занесите их в табл.4.2. Затем, изменяя емкость в соответствии с табл.4.1, получите экспериментальные данные и занесите их в табл.4.2.

Таблица 4.2

Результаты эксперимента

Ном ер опы та	Характе р нагрузк и	C, мкф	Измеренные Величины				Вычисленные величины					
			I, А	U, В	\cos φ	U_C , В	U_L , В	S, В А	P, Вт	Q, ва р	X_C , О м	X_L , О м
1.	$X_L \ll X_C$											
2.	$X_L \ll X_C$											
3.	$X_L \ll X_C$											
4.	$X_L = X_C$											
5.	$X_L \gg X_C$											
6.	$X_L \gg X_C$											
7.	$X_L \gg X_C$											

6. На основании полученных опытных данных рассчитайте величины указанные в табл.4.2, и поперх построенных ранее расчетных зависимостей (по таблице 3.1) постройте графики зависимостей $I = f(C)$; $\cos\varphi = f(c)$; $U_C = f(C)$; $U_L = f(C)$ по полученным экспериментальным данным (таблица 4.2).

7. Сделайте вывод о полученных результатах теоретических и экспериментальных исследований.

8. При выполнении расчетов по пункту 5 следует иметь в виду:

$$U_L = U_C + U \cdot \sin\varphi, \text{ если } X_L > X_C;$$

$$U_L = U_C - U \cdot \sin\varphi, \text{ если } X_L < X_C,$$

а потребляемые мощности определяются исходя из выражений: $S = U \cdot I$, ВА; $P =$

$$U \cdot I \cos \varphi, \text{ Вт; } Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \text{ вар.}$$

Контрольные вопросы

1. Как исходя из полученных данных определить полное, активное и реактивное сопротивление всей цепи?
2. Как рассчитать значение коэффициента мощности цепи с последовательным соединением сопротивления, емкости и индуктивности?
3. На основании каких данных рассчитывают полную и реактивную мощности, потребляемые электрической цепью из сети?
4. В какой электрической цепи и при каких условиях может возникнуть резонанс напряжений?
5. Какие устройства работают с использованием явления резонанса напряжений?
6. К каким отрицательным последствиям может привести непредвиденный резонанс напряжений?
7. Каким образом можно повысить коэффициент мощности цепи?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы

Исследование трехфазной цепи синусоидального тока при соединении однофазных приемников звездой и определение потребляемой ими полной, активной и реактивной мощностей.

Задание по работе

1. Освоить методы расчета трехфазной цепи синусоидального переменного тока при соединении потребителей звездой.
2. Исследовать трехфазную цепь потребителей, имеющих активный характер нагрузки и соединенных звездой, с нейтральным проводом и без него.
3. Исследовать трехфазную цепь приемников при соединении звездой, когда нагрузка фаз разнородна.
4. Выполнить необходимые расчеты по проведенным экспериментам и построить векторные диаграммы.

5.3. Основные теоретические положения

Объединения нескольких цепей с независимыми источниками проводниками линии

существенно улучшают технико-экономические показатели условия передачи электроэнергии / 1 /.

Объединенные цепи переменного тока принято называть фазами, а всю систему - многофазной системой.

Источником энергии для такой системы является трехфазный генератор. Мгновенные значения э.д.с. трех обмоток генератора можно представить, как

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t, \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{aligned} \quad (5.1)$$

либо в виде векторов

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E_\Phi, \\ \dot{E}_B &= E_\Phi e^{-j\frac{2\pi}{3}}, \\ \dot{E}_C &= E_\Phi e^{-j\frac{4\pi}{3}}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ - векторы фазных э.д.с.;

а $E_\Phi = E_m / \sqrt{2}$ - действующее значение фазной э.д.с.

Сумма векторов фазных э.д.с. равны нулю

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Фазные обмотки генератора и фазы потребителя можно соединить звездой. В этом случае концы обмоток генератора и приемника объединяются соответственно вместе, образуя два узла О, О', которые между собой соединяются общим нейтральным проводом ОО (рис.5.1).

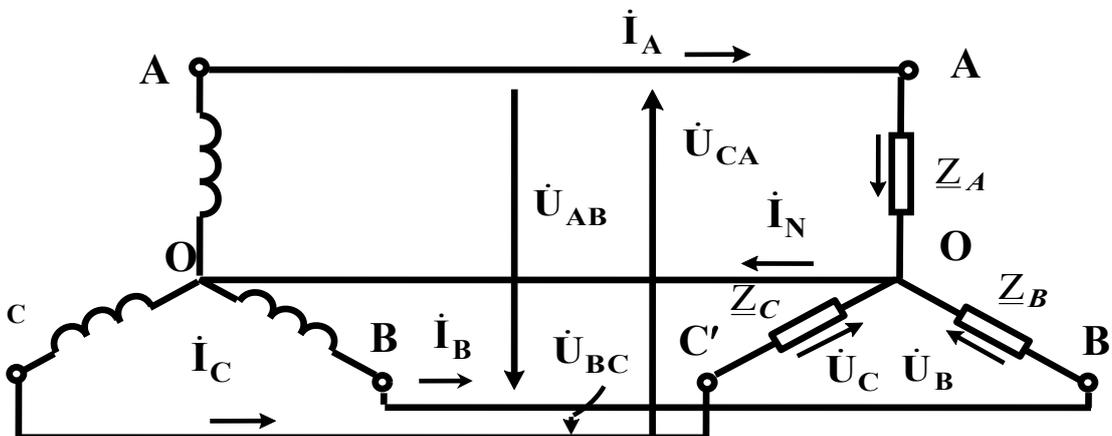


Рис. 5.1. Схема трехфазной системы,

соединенной «звездой»

Провода AA', BB', CC' называются линейными. Напряжения между линейными проводами \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} называются линейными. Напряжения между линейными проводами и нейтрал \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C называются фазными.

На основании второго закона Кирхгофа между линейными и фазными напряжениями может быть найдена взаимосвязь:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\quad (5.3)$$

Одинаковая нагрузка трех фаз называется симметричной. В этом случае нейтральный провод не нужен.

При соединении звездой линейные токи равны фазным

$$I_L = I_\Phi. \quad (5.4)$$

В случае расчета трехфазных симметричных или несимметричных цепей, но с нейтральным проводом, проводимость которого $Y_0 = 0$, следует пользоваться законом Ома

$$\dot{I}_\Phi = \dot{U}_\Phi / \underline{Z}_\Phi, \quad (5.5)$$

где \underline{Z}_Φ - комплексное сопротивление фазы.

В противном случае на основании метода узлового напряжения необходимо найти U_0 - напряжение между нулевыми точками OO'.

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_0}, \quad (5.6)$$

где - $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазные напряжения трехфазного источника энергии.

Фазные напряжения приемника определяются формулами:

$$\dot{U}_{АП} = \dot{U}_A - \dot{U}_0; \dot{U}_{ВП} = \dot{U}_B - \dot{U}_0; \dot{U}_{СП} = \dot{U}_C - \dot{U}_0. \quad (5.7)$$

Далее токи можно определить по закону Ома (5.5).

Ток в нейтральном проводе будет определен на основании первого закона Кирхгофа:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (5.8)$$

Мощность, потребляемая трехфазным потребителем, может быть определена по формулам:

- активная

$$P = P_A + P_B + P_C; P_\phi = V_{\phi\Pi} I_{\phi\Pi} \cos \varphi_{\phi\Pi} \quad (5.9)$$

- реактивная

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C; Q_\phi = V_{\phi\Pi} I_{\phi\Pi} \sin \varphi_{\phi\Pi} \quad (5.10)$$

- полная

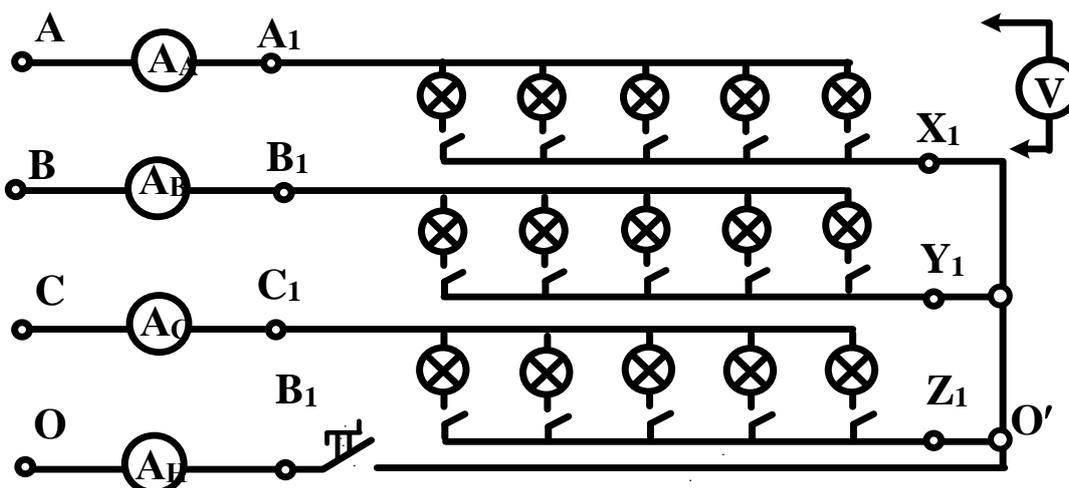
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (5.11)$$

где $P_A, P_B, P_C, Q_A, Q_B, Q_C$ - активные и реактивные мощности, потребляемые фазами приемника. $V_{\phi\Pi}, I_{\phi\Pi}, \varphi_{\phi\Pi}$ - фазные напряжения, токи, углы фазового сдвига.

Порядок выполнения работы и обработки результатов измерения

1. Соберите схему по рис. 5.2, запишите технические характеристики приборов и оборудования. Получите разрешение преподавателя на включение стенда.

Рис. 5.2. Схема опыта при активной нагрузке



трехфазной системы, соединенной звездой

2. Получите опытные данные для случаев:

- симметричной активной нагрузки с нейтральным проводом и без него;
- несимметричной активной нагрузки с нейтральным проводом и без него, при этом часть ламп в фазах по указанию преподавателя выключается;
- обрыва одной фазы с нейтральным проводом и без него (крайний случай несимметрии);
- короткого замыкания одной фазы без нейтрального провода (крайний случай несимметрии).

Полученные результаты занесите в табл.5.1.

Таблица 5.1
Результаты измерений и вычислений по пунктам 2 и 5

Номер опыта	Характеристика нагрузки	Выключатель В1 Вкл., (Выкл.)	Измерено							Вычислено					
			I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	$U_{AB}; U_{BC}; U_{CA}, V$	U_A, B	U_B, B	U_C, B	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$R_A, Ом$	$R_B, Ом$
1.	$R_A =$ $R_B =$ R_C														
2.	$R_A =$ $R_B =$ R_C														
3.	$R_A \neq$ $R_B \neq$ R_C														
4.	$R_A \neq$ $R_B \neq$ R_C														
5.	обр														
6.	ЫВ														
7.	КЗ														

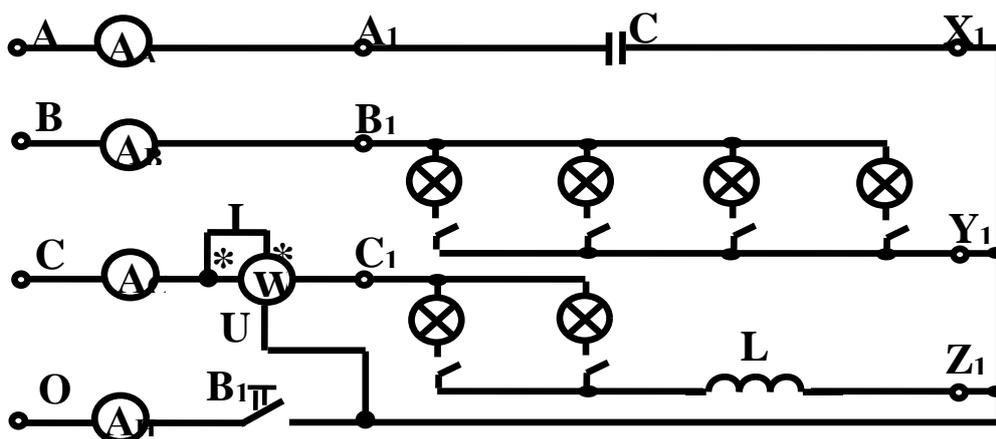


Рис. 5.3. Схема опыта при разнородной несимметричной нагрузке трехфазной системы

5. Заполните графы табл.5.1 "Вычислено" и постройте векторные диаграммы для всех случаев без нейтрального провода.

6. Используя зависимости:

$$P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi, S_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi},$$

$$Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi, Q_{\Phi} = S_{\Phi} - P_{\Phi},$$

ВЫЧИСЛИТЕ активную, реактивную и полную мощности, потребляемые фазой приемника. Мощность трехфазной системы, соединенной "звездой", определяется как сумма мощностей фаз.

В случае симметричной трехфазной системы ее мощность определяется выражениями:

$$P = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi_{\Phi}; S = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л}.$$

Практическое построение векторной диаграммы по данным измерений производится путем вписывания в равносторонний треугольник линейных напряжений

$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ лучей фазных напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ с помощью циркуля.

При обрыве одной фазы (рис.5.4) напряжения уцелевших фаз уравниваются линейными.

Векторные диаграммы для случаев обрыва и короткого замыкания одной фазы представлены соответственно на рис.5.4 и 5.5.

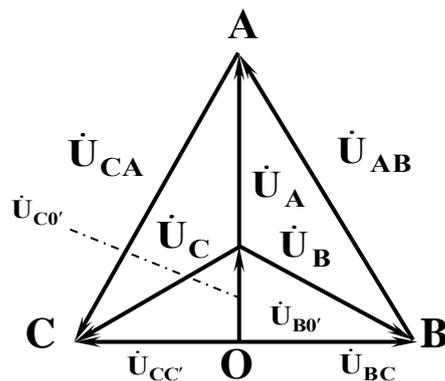


Рис.5.4. Обрыв одной фазы

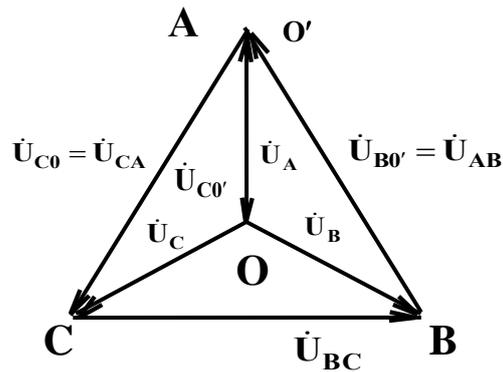


Рис.5.5. Короткое замыкание одной фазы (А)

Контрольные вопросы

1. Почему в опыте короткого замыкания одной фазы обязательно отключать нейтральный провод?
2. Как влияет включение-отключение нейтрального провода на распределение фазных напряжений и токов?
3. Каковы соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении звездой?
4. Чем отличаются векторные диаграммы при коротком замыкании и обрыве одной фазы?
5. Как найти полную, активную и реактивную мощности трехфазной системы?
6. Почему нельзя включать плавкий предохранитель в нейтральный провод?
7. Как по опытным данным найти ток в нейтральном проводе, не измеряя его?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы

Ознакомиться с устройством и работой однофазного трансформатора.

Освоить приемы лабораторных исследований различных режимов работы трансформатора, определения его параметров, расчета и построения характеристик.

Задание по работе

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и записать паспортные номинальные параметры трансформатора: $U_{1н}$, S_n , $I_{1н}$, $I_{2н}$.
2. Собрать схему испытания однофазного трансформатора (рис.6.1).
3. Выполнить опыты холостого хода, короткого замыкания и нагрузки трансформатора.
4. По результатам опытов сделать необходимые расчеты и заполнить соответствующие таблицы в разделах "Вычислено".
5. Построить внешнюю характеристику трансформатора, используя экспериментальные

данные опытов нагрузки.

6. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора построить расчетную зависимость $\eta = f(\beta)$.

Основные теоретические положения

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одного переменного напряжения в другое (или несколько других) той же частоты.

Область применения трансформаторов очень широка. По назначению они подразделяются на силовые, сварочные, измерительные и т.д. Этим объясняется их конструктивное разнообразие и большой диапазон мощностей.

Трансформатор состоит из стального магнитопровода, на который устанавливается две или более обмоток. Одна из обмоток является первичной. Если к первичной обмотке подвести напряжение U_1 от источника питания переменного тока, то под действием этого напряжения в витках обмоток w_1 начнет протекать ток i_1 , создающий магнитодвижущую силу $i_1 w_1$, которая в свою очередь создаст переменный основной магнитный поток Φ_0 . Этот поток, замыкаясь по стальному магнитопроводу, оказывается сцепленным как с первичной, так и со вторичной (или вторичными) обмоткой и индуцирует в первичной обмотке э.д.с. самоиндукции:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

а во вторичной - э.д.с. взаимной индукции:

$$e_2 = -w_2 (d\Phi/dt) \quad (6.2)$$

При синусоидальном первичном напряжении магнитный поток также будет синусоидальным: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Тогда (6.1) и (6.2) можно записать в виде

$$e_1 = -\omega W_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (6.3)$$

и

$$e_2 = -\omega W_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (6.4)$$

где E_{1m} и E_{2m} - амплитудные значения э.д.с. первичной и вторичной обмоток. Соответственно действующие значения первичной и вторичной э.д.с.

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega W_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f W_1 \Phi_m, \quad (6.5)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f W_2 \Phi_m, \quad (6.6)$$

где f - частота переменного тока.

Отношение э.д.с. первичной обмотки к вторичной называется *коэффициентом трансформации*:

$$\eta = E_1/E_2 = w_1/w_2 \quad (6.7)$$

Основными характеристиками трансформатора являются мощность, напряжение, токи и др., которые в виде номинальных параметров (S_H , U_{1H} , U_{2H} , I_{1H} , I_{2H} и т.д.) указываются в паспортах трансформаторов.

Часть параметров η , I_{10} , U_k определяется опытным путем в результате опытов холостого хода и короткого замыкания.

КПД трансформаторов определяется как $\eta = P_2/P_1$.

КПД современных трансформаторов очень высок, и у мощных трансформаторов может превышать 0,99. По этой причине прямое определение его затруднительно (по причине ошибок измерения). Поэтому чаще применяют косвенное измерение КПД по результатам опытов короткого замыкания и холостого хода:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_K - P_0}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_K + P_0}, \quad (6.8)$$

где P_0 и P_K - мощности потерь при опытах холостого хода и короткого замыкания;

β - коэффициент нагрузки трансформатора;

$\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности приемника.

Так как при холостом ходе трансформатора ток в первичной обмотке мал, то соответственно малы и потери мощности в этой обмотке. Следовательно, потери будут иметь место лишь в магнитопроводе (т.е. потери в стали) т.е. $P_0 \approx P_{ст}$.

При опыте короткого замыкания ток в обмотках равен номинальному, а первичное напряжение мало. Поэтому пропорционально связанный с этим напряжением магнитный поток также мал и потери в сердечнике трансформатора будут незначительны. Следовательно, потери мощности будут только в обмотках трансформатора (т.н. потери в меди) $P_{KH} \approx P_M$.

Наряду с опытами холостого хода и короткого замыкания важными также являются опыты нагрузки трансформатора, по результатам которых проверяются его номинальные параметры и снимается внешняя характеристика, определяющая зависимость вторичного напряжения U_2 от тока I_2 при постоянном коэффициенте мощности $\cos \varphi_2$ приемника и номинальном первичном напряжении $U_1 = U_{1H}$.

Порядок выполнения работы и обработки результатов измерения

1. Для выполнения опыта холостого хода трансформатора отключите выключатель SA (рис.6.1) и установите ЛАТРОм напряжение $U_1 = U_{1H}$. Данные опыта холостого хода запишите в табл.6.1.

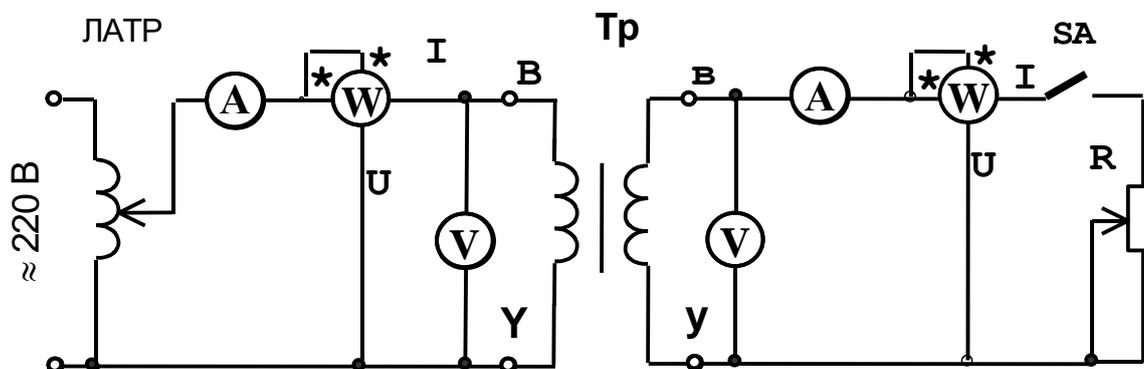


Рис.6.1.Схема испытания трансформатора

2. По данным опыта холостого хода определите параметры трансформатора в соответствии с разделом "Вычислено" табл.6.1:

- коэффициент трансформации:

$$K = U_{1H} / U_{20}; \quad (6.9)$$

- значение тока холостого хода, %:

$$I_{10*} = (I_{10} / I_{1H}) \cdot 100\%; \quad (6.10)$$

- активное сопротивление цепи намагничивания, Ом:

$$r_m = P_0 / I_{10}^2; \quad (6.11)$$

- полное сопротивление цепи намагничивания, Ом:

$$Z_m = U_{1H} / I_{10}; \quad (6.12)$$

- индуктивное сопротивление цепи намагничивания, Ом:

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}; \quad (6.13)$$

- коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos(\varphi_0) = \frac{P_0}{U_{1H} I_{10}}; \quad (6.14)$$

- угол магнитного запаздывания, град.:

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0, \quad (6.15)$$

где $\varphi_0 = \arccos\left(\frac{P_0}{U_{1H} I_{10}}\right)$.

Таблица 6.1

Результаты опыта холостого хода

Измерено				Вычислено						
I_{10}, A	$P_0, Вт$	$U_{1H}, В$	$U_{20}, В$	K	$I_{10}^*, \%$	$r_m, Ом$	$Z_m, Ом$	$X_m, Ом$	$\cos\varphi_0$	δ

3. Для проведения опыта короткого замыкания трансформатора выведите ЛАТР в исходное (нулевое) положение и обесточьте испытываемую цепь (рис.7.1). После этого замкните вторичные зажимы (а,х) трансформатора накоротко, включите питание и, плавно поднимая ЛАТРОм напряжение, установите ток $I_1 = I_{1H}$. Данные измерений запишите в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты опыта короткого замыкания

Измерено				Вычислено			
$U_{1K}, В$	I_{1K}, A	$P_K, Вт$	I_{K2}, A	$U_K, \%$	$R_K, Ом$	$Z_K, Ом$	$X_K, Ом$

4. По данным опыта короткого замыкания определите соответствующие параметры трансформатора:

- напряжение короткого замыкания, %

$$U_K = (U_{1K} / U_{1H}) 100\%; \quad (6.16)$$

- активное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$R_K = P_K / I_{1H}^2; \quad (6.17)$$

- полное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$Z_K = U_{K1} / I_{1H}; \quad (6.18)$$

- индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}. \quad (6.19)$$

Найденные значения параметров занесите в раздел "Вычислено" табл.7.2.

5. Для проведения опытов нагрузки трансформатора обесточьте схему испытания,

снимите закорачивающую перемычку и включите выключатель SA. Установите в первичной цепи номинальное напряжение $U_1 = U_{1H}$ и, изменяя с помощью реостата R нагрузку, снимите 5 - 6 точек показаний при значениях тока $I_2 < 1,5 I_{2H}$. Результаты измерений занесите в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты опытов нагрузки трансформатора

Номер опыта	Измерено						Вычислено				
	$U_{1H}, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$P_2, Вт$	$\cos(\varphi)$	η	β	$P_{п}, Вт$	$P_{пр}, Вт$
1.											
2.											
3.											
4.											
5.											

6. По результатам опытов нагрузки вычислить и записать в табл.6.3 следующие значения параметров трансформатора:

- коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = P_1 / (U_{1H} I_1); \quad (6.20)$$

- коэффициент полезного действия

$$\eta = (P_2 / P_1) * 100\%; \quad (6.21)$$

- мощность потерь, Вт

$$P_{п} = P_1 - P_2 \quad \text{и} \quad P_{пр} = \beta^2 P_{KH} + P_0; \quad (6.22)$$

- коэффициент нагрузки

$$\beta = I_2 / I_{2H}. \quad (6.23)$$

7. Используя результаты опыты нагрузки (табл.6.3), построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

Контрольные вопросы

1. Что такое трансформатор?
2. Область применения трансформаторов.
3. Коэффициент трансформации и его определение.
4. Что называют опытом холостого хода?

5. Суть и назначение опыта короткого замыкания.
6. От чего зависят потери в стали и обмотках трансформатора и по результатам каких опытов их можно определить?
7. Что такое коэффициент нагрузки трансформатора?
8. Как определить КПД трансформатора?
9. Отличается ли э.д.с. трансформатора от напряжения на его обмотках при холостом ходе и при нагрузке?
10. Как можно уменьшить потери трансформатора?
11. Что такое внешняя характеристика трансформатора и как она рассчитывается?
12. Как определяется коэффициент мощности трансформатора?
13. Как найти полную мощность, потребляемую трансформатором?
14. Как определить полное, активное и индуктивное сопротивления обмотки трансформатора?

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Лабораторная работа №1.....	6
Лабораторная работа №2.....	12
Лабораторная работа №3.....	16
Лабораторная работа №4.....	24
Лабораторная работа №5.....	30
Лабораторная работа №6.....	36

Методические указания
для обучающихся по направлению 20.03.02
Природообустройство и водопользование

Издается в авторской редакции

Составители:

Иванов Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»