

**Министерство высшего и среднего специального  
образования республики Узбекистан  
Ташкентский государственный авиационный институт**

---

---

**А. М. Плахтиев**

**Руководство  
к лабораторным работам  
по электротехнике  
с основами электроники**

**Ташкент – 2006**

А.М. Плахтиев

Руководство к лабораторным работам по электротехнике с основами электроники. Учебное пособие, Ташкент, 2006.

В учебном пособии приведены методические указания, общие рекомендации и программы подготовки и проведения экспериментальных исследований электрических и измерительных цепей и электротехнических и электронных устройств, изучаемых студентами неэлектротехнических специальностей в курсе “Электротехника, электроника, электропривод”. Оно может быть полезным студентам, изучающим курсы “Электротехника”, “Электротехника с основами электроники”.

Материал изложен в соответствии с методикой проведения лабораторных занятий, принятой в ТГАИ, и предназначен студентам бакалавриата.

Может быть полезным студентам магистратуры и преподавателям, занимающимся разработкой учебных пособий к занятиям студентов и учащихся неэлектротехнических специальностей в электротехнических лабораториях вузов и колледжей.

Ответственный редактор зав. кафедрой  
докт. тех. наук проф. М.И. Ибадуллаев

*Утверждено к печати научно – методическим советом  
Ташкентского государственного авиационного института*

## Предисловие

Предлагаемое пособие составлено в соответствии с методикой проведения занятий по электротехнике, электронике и электроприводу, принятой на кафедре “Электрооборудование летательных аппаратов и аэропортов” Ташкентского государственного авиационного института, и предназначено студентам неэлектрических специальностей вузов.

Курс “Электротехника, электроника, электропривод” по своему существу требует полного сочетания теории и практики. Для того, чтобы хорошо знать его, необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи, решение которых может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методами. Экспериментальные методы решения изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия по курсу имеют целью:

1) дать возможность подробно ознакомиться с устройством и характеристиками наиболее важных электротехнических приборов, аппаратов и машин, составляющих предмет лабораторной практики;

2) помочь овладеть практическими способами настройки и управления электротехнических устройств на заданный режим;

3) научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических устройств;

4) выработать умение выносить суждение о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных электротехнических устройств для решения тех или иных практических задач.

Кафедра считает важным, что еще до прихода в лабораторию каждый участник занятия обязан получить представление о сущности процессов, происходящих в объектах исследования, и экспериментальных методах их анализа. Тогда он сможет осмысленно и целеустремленно участвовать в поиске экспериментального решения поставленных задач. Все это студенты могут проделать или отыскать самостоятельно, руководствуясь рабочим заданием к лабораторному занятию и учебной литературой, указанной в программе курса в качестве основной.

В соответствии с такой установкой и было подготовлено предлагаемое учебное пособие. В нем содержатся общие рекомендации и конкретные задания по осуществлению экспериментальных исследований электрических и измерительных цепей и электротехнических устройств и элементов электроники с учетом требований техники электробезопасности; приведены

программы по выполнению рабочих заданий, пояснения к работе, предусматривающие обращение к учебникам; даны технические характеристики объектов исследований и средств измерений, предоставляемых в распоряжение участников занятий.

При разработке тематики лабораторных занятий стремились поставить такие задачи, которые служили бы иллюстрациями практических применений электротехнических устройств контроля, регулирования и исследования инженерно – физических систем. Одновременно с этим рабочие задания составлены с учетом возможности их выполнения, как на универсальных лабораторных стендах, так и с применением простых доступных устройств и приборов.

# **I. Общие рекомендации по проведению лабораторного эксперимента**

## **ПРАВИЛА**

### **выполнения работ в лаборатории электротехники с основами электроники**

1. Для выполнения работ студенты объединяются в бригады по 2-4 человека.
2. К предстоящей лабораторной работе они должны заранее подготовиться, ознакомившись с описанием работы и рекомендованной литературой.
3. Преподаватель проверяет подготовленность студентов, наличие у каждой бригады “Тетради протоколов” с заготовленными таблицами, схемами и расчетными формулами. Неподготовленные студенты к работе не допускаются.
4. Получив разрешение преподавателя, студенты приступают к монтажу схемы на закрепленном за ними рабочем месте.  
Запрещается переносить приборы с одного рабочего места на другое.
5. Смонтированная схема проверяется и обсуждается всеми членами бригады, после чего предъявляется на проверку преподавателю. Не допускается включение схемы без разрешения преподавателя. Студенты несут материальную ответственность за повреждение приборов, происшедшее по их вине.
6. Получив разрешение преподавателя, студенты приступают к экспериментам, которые проводят с соблюдением правил техники безопасности. По окончании всех измерений, предусмотренных программой работы, производятся необходимые расчеты. Результаты наблюдений и вычислений вносятся в таблицы протокола.
7. По окончании работы протокол предъявляется преподавателю. Только после подписи протокола преподавателем студенты разбирают схему. Они должны аккуратно поставить приборы на соответствующие места и отнести соединительные проводники к месту хранения.
8. На основании своего протокола студенты производят обработку результатов наблюдений (выполняют расчеты, строят графики и диаграммы) и оформляют отчеты. Только после сдачи отчетов по предыдущей работе студенты допускаются к следующей.

### **Указания к монтажу схем лабораторных работ**

1. Монтаж должен производиться в полном соответствии со схемой, приведенной в “Руководстве к лабораторным работам”, и паспортом к работе.
2. При монтаже схемы различные элементы ее (реостат, катушки и т. д.) и измерительные приборы следует расположить на рабочем месте так, чтобы:

а) соединительные проводники были наиболее короткими и возможно проще располагались по схеме, не переплетаясь между собой и не закрывая измерительных приборов;

б) удобно было производить отсчеты по измерительным приборам и на показания последних не оказывали влияния магнитные поля, создаваемые отдельными участками схемы;

в) регулирующие аппараты (реостаты, автотрансформаторы и т. д.) и все другие элементы схемы, с которыми приходится производить частые манипуляции при выполнении работы, были расположены в удобных для этого местах.

3. Сначала следует собирать основную токовую цепь схемы. В цепях постоянного тока и однофазных цепях переменного тока токовую цепь следует начинать собирать от одного из зажимов рубильника и соединять элементы схемы в той же последовательности, в которой они расположены на схеме в руководстве, пока цепь не будет подключена к другому зажиму рубильника.

В трехфазных цепях следует собирать токовую цепь каждой фазы, начиная от соответствующего зажима рубильника вдоль линии фазы.

4. После сборки основной токовой части схемы, следует перейти к подключению цепей напряжения измерительных приборов и других вспомогательных ответвлений.

5. Следует по возможности избегать подключений к одному из зажимов большого числа соединительных проводников, размещая их, если возможно, на других равноценных по схеме зажимах или используя колодки с несколькими зажимами.

6. В монтаже схемы должны принимать участие все студенты бригады, но не одновременно, а по очереди.

## **Проведение эксперимента**

Получив разрешение преподавателя на проведение лабораторного исследования, следует, руководствуясь ранее составленной рабочей схемой, немедленно приступить к сборке электрических цепей на рабочем месте. Рекомендуется придерживаться следующего порядка, значительно облегчающего сборку элементов рабочего стенда и гарантирующего от многих ошибок при соединениях. Общим правилом является соединение сначала участков цепи с последовательным соединением элементов испытуемого устройства и приборов, а затем параллельных ветвей как объекта исследования, так и приборов. В последнюю очередь включают обмотки вольтметров и параллельные обмотки ваттметров.

Описанный прием позволяет сознательно подойти к оценке назначения каждого элемента цепи и тем самым правильно осуществить ее сборку.

Одновременно со сборкой цепей надо произвести маркировку измерительных приборов в соответствии с их условными обозначениями на предварительно составленной рабочей схеме соединений. Маркировку

приборов на стенде осуществляют посредством бумажных или картонных бирок, которые заготавливает выполняющий лабораторное исследование.

Во избежание возможного возникновения больших токов в собранной цепи элементы регулирования потенциометров необходимо установить в положение, соответствующее минимуму напряжения на выходе, указатели лабораторных автотрансформаторов поставить в позицию “Нуль”, полностью ввести реостаты, в магнитопроводах дросселей создать минимальные воздушные зазоры, а тумблеры регулируемых конденсаторов установить в позиции, соответствующие минимуму емкости.

Собранную цепь следует обязательно показать для проверки преподавателю и только с его разрешения можно включить источник питания и произвести предварительное опробование цепи, чтобы убедиться в возможности проведения опыта при заданных пределах измерения величин. Нельзя приступать к измерениям, не будучи совершенно уверенным, что цепь собрана правильно.

Если при испытании цепи постоянного тока стрелка поляризованного прибора уходит за пределы шкалы в обратном направлении, надо отключить цепь и переключить подходящие к прибору провода.

При снятии характеристик недопустимо превышать номинальные значения токов и напряжений испытываемого электротехнического устройства, если нет особых указаний в руководстве по лабораторному эксперименту. В случае если стрелка какого-либо прибора выходит за пределы шкалы, надо немедленно отключить цепь от источника питания и либо заменить прибор, либо изменить условия эксперимента (уменьшить напряжение питания, увеличить диапазон изменения сопротивления и т. д.).

После предварительного опробования цепи, проверки или оценки диапазона изменения переменного параметра необходимо наметить последовательность отдельных манипуляций и отсчетов, а затем приступить к наблюдениям.

Отсчеты рекомендуется производить по возможности одновременно по всем приборам. Следует избегать перерыва начатой серии наблюдений и во всех случаях, когда возникает сомнение в правильности полученных наблюдений, необходимо повторить их несколько раз.

Результаты всех первичных наблюдений и отсчетов записывают в таблицу протокола испытаний. Запись отсчетов должна вестись в точном соответствии с показаниями измерительных приборов, без всяких пересчетов в уме, хотя бы простейших. Так, если отсчет делается по шкале многопредельных приборов, то записываются деления шкалы без умножения их на цену деления, иначе ошибка при пересчете так исказит запись, что окажется невозможным установить, где промах: в наблюдении или при пересчете.

Протоколы наблюдений являются единственным документальным следом, остающимся от измерения, поэтому от точной и своевременной фиксации его в таблицах результатов отсчета в значительной степени зависит успех экспериментальной работы.

При переходе от одного этапа исследования к другому необходимо каждый раз обращаться к преподавателю за проверкой правильности полученных результатов, которые представляют в виде таблиц протокола или графиков.

К следующему этапу работы разрешается преступать только после проверки и визирования протокола преподавателем.

## **Обработка результатов и оформление отчета**

Каждый студент самостоятельно должен обработать данные опыта и подготовить отчет о проделанной работе.

### **Форма титульного листа**

Министерство высшего и среднего специального образования  
Республики Узбекистан

Ташкентский государственный авиационный институт

Кафедра "Электрооборудование летательных аппаратов и аэропортов"

Предмет "Электротехника, электроника, электропривод"

## **О т ч е т**

по работе № \_\_\_\_\_  
(полное наименование работы)

Работа выполнена \_\_\_\_\_  
(дата выполнения)

Студент \_\_\_\_\_ Группа \_\_\_\_\_  
(фамилия и инициалы) (№ группы)

Отчет принят \_\_\_\_\_  
(дата принятия отчета)

Преподаватель \_\_\_\_\_  
(подпись)

Отчет должен содержать рабочее задание, паспортные данные объекта исследования, схемы соединения элементов объекта исследования с включенными измерительными приборами, таблицы с записью результатов эксперимента, графики зависимостей и векторные диаграммы,

пояснительные рисунки, решения задач, а также спецификацию измерительных приборов, составленную в виде табл. 1:

Таблица 1

Наименование прибора	Условное обозначение на схеме	Система	Предел измерений	Класс точности	Заводской номер	Примечание

После проведения эксперимента должны быть сделаны основные выводы, полученные в результате исследования.

Каждая схема должна быть сопровождается соответствующей таблицей записей результатов измерений и графиком, иллюстрирующим изучаемые зависимости. В таблице обязательно следует указывать, в каких единицах измерены исследуемые величины. Все таблицы необходимо снабдить заголовками, характеризующими проводимый опыт.

На основании результатов измерений проводится их окончательная обработка. В условиях лабораторного практикума по ТЭЦ во всех работах обработку результатов эксперимента можно ввести с помощью калькулятора. Измеренные и вычисленные величины заносят в одну таблицу, составленную по прилагаемой форме:

Таблица 2

Измеренные величины						Расчетные величины			
$I_1$	$U_1$	$I_1$		$P$		$\cos \varphi$	$Z$	$C$	$L$
А	В	дел	А	дел	Вт	-	Ом	мкФ	мГ

Вычеркивание схем и таблиц рекомендуется производить карандашом, но обязательно с помощью линейки.

Особое внимание надо уделять графикам зависимостей между величинами, ибо они являются наглядным результатом работы, графическим ответом на вопросы, поставленные экспериментатором.

Графики следует вычерчивать по координатным сеткам, размером не менее 100 · 100 мм, желательно на миллиметровой бумаге; по осям приводят стандартные условные буквенные обозначения величин и единиц их измерения, указывают деления с одинаковыми интервалами,

соответствующие откладываемым в принятых единицах измерения, или в десятичных кратных либо дольных единицах.

Числовые отметки у масштабных делений принято выбирать такими, чтобы они составляли  $10 \pm^n$ ,  $2 \cdot 10 \pm^n$  или  $5 \cdot 10 \pm^n$  от тех единиц, в которых выражены величины, откладываемые по осям. Например, 10 мА; 0,02 Ом; 500 Вт и т.д.

При построении графиков вдоль оси абсцисс в выбранном масштабе откладывают независимую переменную. Условное буквенное обозначение этой величины рекомендуется ставить под осью, а наименование единиц измерения либо их десятичных кратных или дольных единиц – после обозначения величины. Вдоль оси ординат масштабные цифры ставят слева от оси, наименование или условное обозначение откладываемых величин – также слева от оси и под этим обозначением указывают единицу измерения. Если в одних координатных осях строят несколько графиков функций одной независимой переменной, то следует провести дополнительные шкалы параллельно основным, каждую со своим масштабом. Если величины по осям абсцисс и ординат отложены в определенном масштабе с числовыми отметками, то не следует ставить стрелок, указывающих направление роста численных значений величин. Наименование единиц измерения дается без скобок.

При вычерчивании графиков надо учитывать, что всякое измерение имеет случайные погрешности (истинное значение измеряемой величины остается неизвестным и вместо него принимают некоторое ее значение, признаваемое за наиболее приближающееся к истинному). Поэтому не следует проводить кривые через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, которые проходят среди экспериментальных точек.

Отступление некоторых точек от плавной кривой называют “разбросом точек”; величина разброса при наблюдении закономерных явлений определяет тщательность проведения эксперимента.

В некоторых случаях графики изображают в виде отрезков прямых, соединяющих опытные точки и образующих ломаные линии. Такие графики отражают влияние различных факторов, не поддающихся точному учету.

При наличии нескольких кривых на одном графике точки, соответствующие опытным данным и относящиеся к различным кривым, должны быть отмечены различными условными значками (крестиками, кружками и т.п.).

Каждый график обязательно должен быть снабжен таким лаконичным текстом, чтобы любой достаточно подготовленный читатель мог легко понять, какую зависимость характеризует построенный график.

На последней странице отчета следует указать дату оформления и поставить подпись.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений.

## II. Рекомендации по электрическим измерениям в лабораторном практикуме

Выполнение любой лабораторной работы по электротехнике сопровождается измерением тока, напряжения и других электрических величин, что позволяет постигнуть сущность исследуемого физического процесса и выявить характеристики того или иного электротехнического устройства. Для обеспечения правильности полученного результата необходимо грамотно использовать имеющиеся в лаборатории средства электрических измерений, уметь оценивать численное значение измеряемой величины с указанием точности полученного результата измерений.

К основным средствам электрических измерений, представленным в лаборатории, относятся: показывающие стрелочные переносные и щитовые приборы – амперметры, вольтметры, ваттметры; цифровой вольтметр; электроннолучевой осциллограф и генератор сигналов.

### Методика определения точности измерения электрических величин

Всякая физическая величина, в том числе и электрическая, характеризуется как своими свойствами, т. е. качественно, так и количественно.

Количественная характеристика оценивается числовым выражением величины, называемым значением величины, которое получается в результате измерения.

При проведении измерений необходимо получить значение измеряемой величины с заданной точностью.

Результат измерения должен быть выражен не одним числом, а двумя числами, только такое представление результата является технически правильным. В результате измерения требуется получить не просто число, а число, именованное оценкой точности полученного значения измеряемой величины, например:

$$I = 4A \pm 0,05 A.$$

Первое слагаемое соответствует показанию прибора, а второе – возможному диапазону погрешности, обусловленной классом точности прибора.

Следует различать точность прибора (средства измерения) и точность измерения определенной величины. Известно, что точность прибора оценивается следующими погрешностями:

*абсолютной погрешностью*

$$\Delta = \pm a,$$

где  $\Delta$  - разность между измеренной прибором величиной  $x$  и истинным значением измеряемой величины  $x_0$ ;  $\Delta = x - x_0$ ;

*приведенной погрешностью*

$$\gamma = \pm 100 \Delta / x_N \%,$$

где  $\gamma$  – предел допускаемой приведенной погрешности в процентах от нормирующего значения  $x_N$ .

Величина  $x_N$  определяется видом шкалы прибора.

*Точность измерения оценивается относительной погрешностью*

$$\delta = \pm 100\Delta / x \%,$$

где  $\delta$  – предел допускаемой относительной погрешности в процентах от значения измеряемой величины  $x$ .

Всем приборам в зависимости от пределов допускаемых погрешностей присваиваются классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Зная указанный на шкале прибора класс точности  $K$  и уравнения

$$\gamma = K = \pm 100 \Delta / x_N \%, \quad \delta = \pm 100\Delta / x \%,$$

можно определить относительную погрешность измерения:

$$\delta = \pm K x_N / x.$$

Результат измерения в общем виде выражается формулой

$$X = x ( 1 \pm \delta ).$$

Так как почти всегда  $x < x_N$ , то  $\delta > \gamma$ . Для повышения точности измерения не обязательно выбирать прибор более высокого класса точности, очень важно правильно подобрать предел измерения прибора. Прибор надо выбирать так, чтобы предел измерения был близок к измеряемому значению.

**Пример.**

$$\text{I } A_1 \quad K = 0,5 \quad I_n = 25\text{A} \quad I = 2,5\text{A}$$

$$\text{II } A_2 \quad K = 1,0 \quad I_n = 5\text{A} \quad I = 2,5\text{A}$$

Тогда  $\delta_1 = 0,5 \cdot 25 / 2,5 = 5\%$ ,  $\delta_2 = 1 \cdot 5 / 2,5 = 2\%$ .

Результаты измерения:

первым амперметром –  $I_1 = 2,5 \pm 2,5 \cdot 5 / 100 = 2,5 \pm 0,125 \text{ A}$ , или, пользуясь правилами округления (см. ниже,  $I_1 = (2,5 \pm 0,1)\text{A}$ , т. е. вероятное значение тока лежит в интервале  $I_1 = (2,6 \div 2,4)\text{A}$ ;

вторым амперметром –  $I_2 = 2,5 \pm 2,5 \cdot 2 / 100 = 2,5 \pm 0,05 \text{ A}$ , или окончательно,  $I_2 = (2,5 \pm 0,05)\text{A}$ , т. е. вероятное значение тока лежит в интервале  $I_2 = (2,55 \div 2,45)\text{A}$ .

Как видно, измерение вторым амперметром более низкого класса точности оказалось более точным.

## Правила округления

При вычислении результата измерений следует соблюдать правила округления.

1. Погрешность дается только одной значащей цифрой.
2. Числовое значение результата должно оканчиваться цифрой или нулем того же десятичного разряда, что и погрешность.

### *Операция округления.*

1. Лишнее значение цифры у целых чисел заменяются нулями.  
Получено  $L = (123357 \pm 678)$  мГ. Надо записать  $L = (123400 \pm 700)$  мГ.
2. Лишнее значение цифры у десятичных дробей отбрасываются.  
Получено  $L = (123,502 \pm 0,03)$  мГ. Надо записать  $L = (123,50 \pm 0,03)$  мГ.
3. Если первая (слева) из заменяемых нулями или отбрасываемых цифр меньше 5, то оставляемые цифры не изменяются.  
Получено  $L = (421,33 \pm 0,95)$  мГ. Надо записать  $L = (421 \pm 1)$  мГ.
4. Если эта цифра выше 5 или равна 5 и последующие цифры не нули, то последняя (справа) цифра увеличивается на единицу.  
Получено  $L = (237,465 \pm 0,0127)$  мГ. Надо записать  $L = (237,50 \pm 0,01)$  мГ.
5. Если она равна 5 с последующими за ней нулями, то округление производится до ближайшего четного числа: если последняя (справа) цифра четная, то она остается без изменения, а нечетная – увеличивается на единицу.
  - а) Получено  $L = (123,500 \pm 1)$  мГ. Надо записать  $L = (124 \pm 1)$  мГ.
  - б) Получено  $L = (124,51 \pm 1)$  мГ. Надо записать  $L = (125 \pm 1)$  мГ.

Приведенной погрешностью оценивается результат только прямых измерений. Результат косвенных измерений следует вычислять по формулам, зависящим от функциональной связи между искомой величиной и величинами, являющимися результатом прямых измерений. Наиболее часты в электротехнике следующие измерения:

### *На постоянном токе*

Измерение сопротивления методом амперметра – вольтметра.

Так как  $R = U/I$ , то погрешность измерения  $\Delta R/R = \Delta U/U + \Delta I/I$ , т.е. относительная погрешность измерения сопротивления равна сумме относительных погрешностей измерения напряжения  $\delta_U$  и тока  $\delta_I$ .

**Пример.** Вольтметр  $U_N = 100$  В,  $K_U = 1,5$  показал  $U = 80$  В. Амперметр  $I_N = 5$  А,  $K_I = 1$  показал  $I = 4$  А.

Определить измеренное сопротивление, пренебрегая влиянием внутренних сопротивлений приборов:

$$\begin{aligned}\delta_V &= K_U \cdot U_N / U = 1,5 \cdot 100 / 80 = 1,875 \%, \\ \delta_I &= K_I \cdot I_N / I = 1 \cdot 5 / 4 = 1,25 \%, \\ \delta_R &= \delta_V + \delta_I = 3,125 \%,\end{aligned}$$

$$R = U/I \pm \delta_R = 80/4 \pm 3,125 \% = 20 \pm 3,125 \cdot 20/100 = (20 \pm 0,625) \text{ Ом.}$$

$$\text{Ответ: } R = (20,0 \pm 0,6) \text{ Ом.}$$

### На переменном токе

1. Измерение коэффициента мощности  $\cos \varphi$  с помощью амперметра, вольтметра, ваттметра.

Так как  $\cos \varphi = P / UI$ , то  $\delta_\varphi = \Delta(\cos \varphi) / \cos \varphi = \Delta P / P + \Delta U / U + \Delta I / I = \delta_P + \delta_U + \delta_I$ .

**Пример.** Вольтметр  $U_N = 75 \text{ В}$ ,  $K_U = 1,5$  показал  $U = 50 \text{ В}$ . Амперметр  $I_N = 2,5 \text{ А}$ ,  $K_I = 1$  показал  $I = 1,5 \text{ А}$ . Ваттметр  $P_N = 75 \text{ Вт}$ ,  $K_P = 0,5$  показал  $P = 50 \text{ Вт}$ .

Определить  $\cos \varphi$ , пренебрегая влиянием внутренних сопротивлений приборов:

$$\delta_U = K_U \cdot U_N / U = 1,5 \cdot 75 / 50 = 2,25\%,$$

$$\delta_I = K_I \cdot I_N / I = 1 \cdot 2,5 / 1,5 = 1,67\%,$$

$$\delta_P = K_P \cdot P_N / P = 0,5 \cdot 75 / 50 = 0,75\%,$$

$$\delta_\varphi = \delta_U + \delta_I + \delta_P = 2,25 + 1,67 + 0,75 = 4,67\%,$$

$$\cos \varphi = P / UI \pm \delta_\varphi = 50 / 50 \cdot 1,5 \pm 4,67\% = 0,67 \pm 4,67 \cdot 0,67 / 100 = 0,67 \pm 0,0314.$$

$$\text{Ответ: } \cos \varphi = 0,67 \pm 0,03.$$

2. Измерение параметров двухполюсника с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра.

Так как  $Z = U / I$ ;  $R = P / I^2$ ;  $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$ , то  $\delta_Z = \delta_U + \delta_I$ ,  $\delta_R = \delta_P + 2 \delta_I$ ,  $\delta_X = [2 \delta_Z + 2 \delta_R] = \delta_U + \delta_P + 2\delta_I$ .

Используя данные предыдущего численного примера, получим:

$$\delta_Z = 2,25 + 1,67 = 3,93\%,$$

$$\delta_R = 0,75 + 2 \cdot 1,67 = 4,09\%,$$

$$\delta_X = 2,25 + 0,75 + 2 \cdot 1,67 = 6,34\%,$$

$$Z = U / I \pm \delta_Z = 50 / 1,5 \pm 3,93\% = 33,2 \pm 33,2 \cdot 3,93 / 100 = (33,2 \pm 1,3) \text{ Ом,}$$

$$R = P / I^2 = 50 / 1,5^2 \pm 4,09\% = 22,2 \pm 22,2 \cdot 4,09 / 100 = (22,2 \pm 0,905),$$

$$X = \sqrt{(U / I)^2 + (P / I^2)^2} \pm \delta_X = \sqrt{33,2^2 - 22,2^2} \pm 6,34\% = \sqrt{610} \pm 6,34\% = 24,8 \pm 24,8 \cdot 6,34 / 100 = (24,8 \pm 1,5),$$

$$X = (24,8 \pm 1,5) \text{ Ом.}$$

По причинам, вызвавшим погрешность, все погрешности могут быть разделены на *систематические* и *случайные*. Основная погрешность прибора содержит обе эти погрешности.

Систематическую погрешность прибора или измерения можно, как правило, уменьшить путем введения поправки или устранения причин, ее

вызвавших, либо специальными методами, применяемыми при точных измерениях.

Случайная же погрешность может быть выявлена только многократными измерениями одной и той же величины и расчетами при помощи уравнений статистической математики с привлечением теории вероятностей.

Случайную погрешность следует определять только тогда, когда заведомо известно. Что она больше систематической погрешности, так как систематическая погрешность не может быть уменьшена с помощью многократных измерений.

При выполнении приведенных лабораторных работ студенческого практикума принимается, что случайные погрешности малы, поэтому измерения проводят однократно с последующей оценкой относительной погрешности.

## **Рекомендации по выбору типа и места включения измерительных приборов**

Представленные в лабораторных работах приборы позволяют произвести измерения тока, напряжения и мощности методом непосредственной оценки, а также сопротивления, емкости, индуктивности и коэффициента мощности косвенным методом.

### **Измерения в цепях постоянного тока**

В цепях постоянного тока могут работать как магнитоэлектрические, так и электромагнитные приборы. При работе с магнитоэлектрическим прибором зажим “+” прибора подключается к положительному зажиму источника питания.

Прибор следует выбрать по пределу измерения так, чтобы он был близок к значению измеряемой величины.

При точных измерениях необходимо следить за тем, чтобы включение прибора не вызывало заметного искажения режима работы исследуемой цепи, для этого нужно знать потребляемую прибором мощность.

Чем больше эта мощность, тем сильнее искажается режим цепи при включении прибора. Особенно сильно это может сказаться при измерениях в маломощных цепях. Потребление вольтметров часто характеризуют также величиной тока полного отклонения (при номинальном значении напряжения) или сопротивлением цепи прибора в Ом $\times$  на 1В номинального напряжения.

*При измерении тока* амперметр и миллиамперметр включают в цепь последовательно с исследуемым объектом. Если сопротивление прибора ( $R_A$ ) соизмеримо с входным сопротивлением измерительной цепи относительно зажимов прибора ( $R_{вхА}$ ), то это может внести погрешность в

результат измерений. Такая погрешность называется погрешностью метода, она равна:

$$\delta_I = - 1/(1 + R_{вхА}/R_A).$$

*При измерении напряжения* вольтметр и милливольтметр включают параллельно исследуемому объекту. В этом случае тоже может возникнуть погрешность метода, если сопротивление прибора ( $R_V$ ) окажется соизмеримым с входным сопротивлением измерительной цепи относительно зажимов прибора ( $R_{вхV}$ ); эта погрешность равна:

$$\delta_V = - 1/(1 + R_{вхV}/R_V).$$

Погрешности метода  $\delta_I$  и  $\delta_V$  могут не приниматься в расчет, если их величина в 5 раз меньше допускаемой погрешности прибора, определяемой его классом точности.

Внутренние сопротивления амперметров составляют десятые и сотые доли ома, миллиамперметров – единицы ом, вольтметров – сотни и тысячи ом, милливольтметров – десятки ом. Их можно определить по данным, указанным на шкале прибора. Наиболее точно ток и напряжение могут быть измерены компенсационным методом.

*Измерение сопротивления* может быть произведено косвенным методом при помощи амперметра (миллиамперметра) и вольтметра (милливольтметра). Точнее малые сопротивления можно измерить одинарным мостом по четырехзажимной схеме или двойным мостом, средние сопротивления – одинарным мостом (обычное включение), большие сопротивления – мегомметром. Средние сопротивления можно измерить также с помощью омметра (точность низкая).

### **Измерения в цепях переменного тока**

В цепях переменного тока используются главным образом электромагнитные и электродинамические приборы.

Прибор следует выбрать по пределу измерения так, чтобы он был близок к значению измеряемой величины. Здесь также могут возникать погрешности метода измерения, определяемые соотношением комплексных сопротивлений прибора и цепи, но в цепях переменного тока обычно они заведомо малы. Особенно ничтожно малым потреблением мощности характеризуются электростатические и электронные вольтметры.

В цепях синусоидального и несинусоидального токов электромагнитные и электродинамические приборы показывают действующее значение измеряемой величины.

*При измерении малых переменных токов и напряжений* иногда указанные приборы не обеспечивают требуемой чувствительности. Тогда следует пользоваться выпрямительными приборами. При этом нужно обратить внимание на то, что их шкалы градуируются в действующих значениях

синусоидального тока или напряжения (а измеритель магнитоэлектрический, реагирующий на средние значения). Поэтому в цепях синусоидального тока эти приборы правильно показывают действующие значения тока или напряжения, но в цепях несинусоидального тока с ними надо обращаться с осторожностью. В последнем случае по выпрямительному прибору можно вычислить только среднее значение измеряемого тока (напряжения), разделив показания прибора ( $A$ ) на коэффициент формы синусоиды:

$$I_{cp} = A/1,11.$$

*При измерениях активной мощности* в однофазных цепях с помощью электродинамического ваттметра необходимо следить за правильным включением прибора в схему: оба его генераторных зажима должны быть включены вместе, последовательная (токовая) обмотка включается последовательно с объектом измерения, а параллельная обмотка – на зажимы исследуемого объекта или участка цепи.

При измерении малых значений активной мощности и отсутствии специального малокосинусного ваттметра можно воспользоваться косвенным методом измерения, например, методом трех вольтметров.

*Измерение реактивной мощности и коэффициента мощности* в однофазных цепях можно выполнить косвенным методом, используя показания амперметра ( $I$ ), вольтметра ( $U$ ) и ваттметра ( $P$ ):

$$Q = \sqrt{(UI)^2 - P^2},$$
$$\cos\varphi = P/UI$$

*При измерении активной мощности* в трехфазных трехпроводных цепях (при симметричном и несимметричном приемниках) необходимо использовать метод двух ваттметров. При этом следят за правильным включением приборов в схему: оба генераторных зажима каждого из ваттметров соединяют вместе и включают на зажимы  $A$  и  $C$  источника питания, тогда негенераторные зажимы обмоток напряжения следует включать на свободную фазу  $B$  источника питания. Негенераторные зажимы последовательных обмоток обоих ваттметров подключают к соответствующим фазным нагрузкам. Активная мощность трехфазного приемника определяется алгебраической суммой показаний ваттметров

$$P_{np} = \pm A_1 \pm A_2.$$

Реактивную мощность симметричного приемника в трехфазных трехпроводных цепях можно определить по показаниям ваттметров, включенных по описанной схеме:

$$Q = \sqrt{3} [(\pm A_1) - (\pm A_2)],$$

где  $A_1$  – показания ваттметра в фазе С;  $A_2$  – показания ваттметра в фазе А.

Характер нагрузки симметричного приемника в этом случае можно определить из соотношения

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3} \cdot ((\pm A_1) - (\pm A_2)) / (\pm A_1 \pm A_2).$$

### **III. Техника безопасности при работе с электрическими установками**

#### **Опасность поражения электрическим током**

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками и при определенных условиях могут стать источником опасности поражения электрическим током. Дело в том, что тело человека обладает свойством электропроводности и при соприкосновении с двумя незаземленными элементами установки, находящейся под напряжением, оно становится звеном электрической цепи. Возникший вследствие этого в теле человека электрический ток может вызвать ожог кожи (электрическую травму) или нанести тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной систем организма (электрический удар).

Установлено, что как постоянный, так и переменный электрические токи при величине 0,05 А являются опасными, а при величине 0,1 А – смертельными. Понятно, что опасность возрастает с увеличением напряжения.

Чтобы оценить, при каком напряжении может быть нанесен серьезный ущерб здоровью человека или какое напряжение считать опасным для жизни, надо знать величину сопротивления тела человека. Однако это чрезвычайно изменчивая величина, зависящая от свойств кожи человека, его душевного состояния и ряда других причин. Как показывают измерения, сопротивление тела человека может изменяться в широких пределах – от 700 до нескольких десятков тысяч ом. Нетрудно подсчитать, что напряжение даже в несколько десятков вольт ( $40 \div 60$  В) может при неблагоприятном стечении обстоятельств создать условия, когда возможен электрический удар. Поэтому следует всегда помнить о возможности поражения электрическим током и соблюдать необходимые меры предосторожности.

#### **Правила электробезопасности во время лабораторных занятий**

1. Приступая к работе с электротехническими устройствами, помните об опасности поражения электрическим током и будьте осторожны.

2. Прежде чем приступать к соединению устройств, расположенных на стенде, убедитесь, что контакты автоматов сетей разомкнуты, а указатели положения элементов регулирования лабораторных автотрансформаторов и источников питания расположены в позиции “Нуль”.

3. Нельзя проверять пальцами наличие напряжения между выводами источников питания или линейных проводов сетей: для этого служит вольтметр или контрольная лампа.

4. Помните, что отключенный конденсатор может сохранять опасный остаточный заряд и не забывайте разрядить его до включения в цепь.

5. Убедитесь в исправности изоляции соединительных проводов. Не пользуйтесь проводами без наконечников или штырей.

6. При сборке цепей избегайте пересечения проводов и обеспечьте высокую плотность контактов всех разъемных соединений. Неиспользуемые провода уберите с монтажных панелей в отведенное для них место.

7. При сборке цепей силового понижающего трансформатора помните об опасности ошибочного соединения выводов обмотки низшего напряжения с проводами сети.

8. Включать автоматы сетей и проводить первое опробование цепей с регулируемыми источниками питания можно только с разрешения руководителя лабораторного занятия.

9. Не прикасайтесь к неизолированным элементам соединительных и коммутационных устройств, находящихся под напряжением.

10. Особую осторожность соблюдайте при исследовании участков цепей с последовательным соединением дросселей и конденсаторов.

11. Категорически запрещается размыкать цепь вторичной обмотки трансформатора тока, если его первичная обмотка включена в сеть.

12. Прежде чем разбирать цепи или производить любые пересоединения в них, убедитесь, что контакты автоматов сети разомкнуты, источники питания отключены.

13. Обнаружив любую неисправность в электротехническом устройстве, находящемся под напряжением, немедленно отключите автомат сети и сообщите об этом руководителю лабораторного занятия.

14. Замену и установку плавкой вставки предохранителя производите при отключенном автомате и только с разрешения руководителя лабораторного занятия.

## **Лабораторная работа № 1**

### **Исследование линейной разветвленной цепи постоянного тока**

**Цель работы.** Экспериментальная проверка законов Кирхгофа, принципа наложения и принципа взаимности на примере разветвленной линейной цепи постоянного тока.

#### **Пояснения к работе**

Состояние любой электрической цепи описывается законами Кирхгофа:

1) для любого узла  $\sum_{k=1}^n I_k = 0$ ,

2) для замкнутого контура  $\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^n I_k R_k$ .

В линейных электрических цепях э. д. с. источников действуют независимо друг от друга. На принципе независимости действия э. д. с. в схеме основан принцип наложения, согласно которому ток в любой ветки можно рассматривать как сумму частичных токов, каждый из которых вызывается только одной из действующих в цепи э. д. с.

### Схема электрической цепи

Для выполнения работы используется электрическая цепь, изображенная на рис. 1.1.

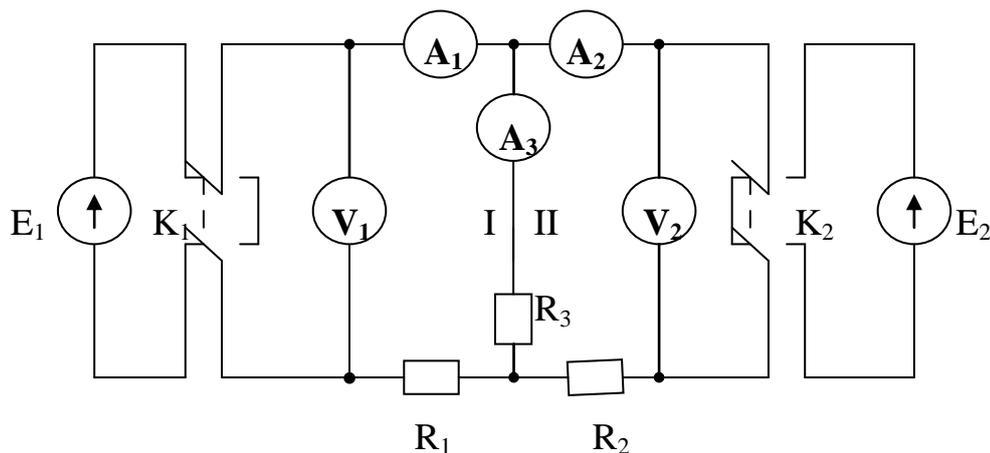


Рис. 1.1.

В качестве источников питания E<sub>1</sub> и E<sub>2</sub> используются либо аккумуляторные батареи, либо выпрямители с постоянным напряжением на выходе 6 ÷ 8 В. При помощи переключателей K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub> источники э. д. с. E<sub>1</sub> и E<sub>2</sub> могут либо включаться в цепь, либо отключаться, либо заменяться проводником, имеющим сопротивление, практически равное нулю.

Измерение токов в ветвях производится с помощью миллиамперметров, измерение напряжения на отдельных участках при помощи вольтметра с пределом измерения на 15 В.

При сборке схемы необходимо обратить внимание на полярность источников э. д. с. и приборов.

## Программа работы

1. Экспериментальная поверка принципа наложения по схеме 1.1.
2. Проверка первого закона Кирхгофа для узла по данным п. 1.
3. Проверка второго закона Кирхгофа для контуров I и II по данным п. 1.

*Примечание.* Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  измерить при помощи моста.

Данные п. 1, 2, 3 внести в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Показания приборов					Проверка законов Кирхгофа		
$E_1$	$E_2$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$\sum IR$ I	$\sum IR$ II	$\sum I$
В	В	мА	мА	мА	В	В	мА

4. Экспериментальная проверка принципа взаимности, для чего одна и та же э. д. с. включается вначале в первую ветвь, затем во вторую.

5. Аналитическая проверка принципа взаимности.

Результаты п. 4, 5 внести в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

$E_1$	$E_2$	$I_1$	$I_2$	Примечание
В	В	мА	мА	
				Экспериментальные данные
				Расчетные данные

## Вопросы

1. Сколько независимых уравнений можно составить по первому и по второму законам Кирхгофа для любой схемы?
2. Применим ли метод наложения к определению мощности?

## Литература

1. Л. 1, § 1-6, 1-9, 1-11.
2. Л. 2, § 1.3, 1.4.
3. Л. 5, § 1.4

## Лабораторная работа № 2

### Передача энергии постоянным током

**Цель работы.** Познакомиться со свойствами линии передачи при нормальных и аварийных режимах работы. Проверить, как меняется с повышением напряжения эффективность передачи мощности.

#### Пояснение к работе

Если считать напряжение  $U_1$  в начале линии электропередачи постоянным, то при различных нагрузках напряжение  $U_2$  на входе приемника будет меняться из-за пропорционального току падения напряжения в линии, т. е.

$$U_2 = U_1 - R_{\text{л}}I,$$

где  $R_{\text{л}}$  – сопротивление линии электропередачи.

Сопротивление  $R_{\text{л}}$  определяется из опыта короткого замыкания  $R_{\text{л}} = U_1 / I_{\text{кз}}$ . Сопротивление нагрузки определяется из соотношения  $R_{\text{н}} = U_2 / I$ .

При изменении нагрузки меняются падение напряжения и потери мощности в линии.

Мощности – отдаваемая генератором и потребляемая приемником – вычисляются по формулам  $P_1 = U_1 I$ ;  $P_2 = U_2 I = I^2 R_{\text{н}}$ .

Коэффициент полезного действия линии определяется из выражения

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Современные линии электропередач обеспечивают к. п. д. 0,94 – 0,97. При низких напряжениях потери напряжения в достаточно длинных линиях потребовали бы применения проводов и кабелей большого сечения для сохранения тех же значений к. п. д.

В целях экономии металла, идущего на изготовление линий, и уменьшения потерь мощности при передаче электрической энергии на достаточно большое расстояние используется высокое напряжение.

### Схема электрической цепи

Схема электрической цепи дана на рис. 2. 1.

Генератор  $\Gamma$  постоянного тока, служащий для питания приемника  $R_H$ , приводится во вращение трехфазным асинхронным двигателем  $\Delta$ . В качестве сопротивления  $R_L$  используется реостат, имеющий сопротивление порядка 50 Ом.

В процессе работы напряжение на зажимах генератора путем изменения тока возбуждения поддерживается постоянным. Рубильник  $K$  служит для создания короткого замыкания. Для получения режима холостого хода достаточно вывернуть все лампочки.

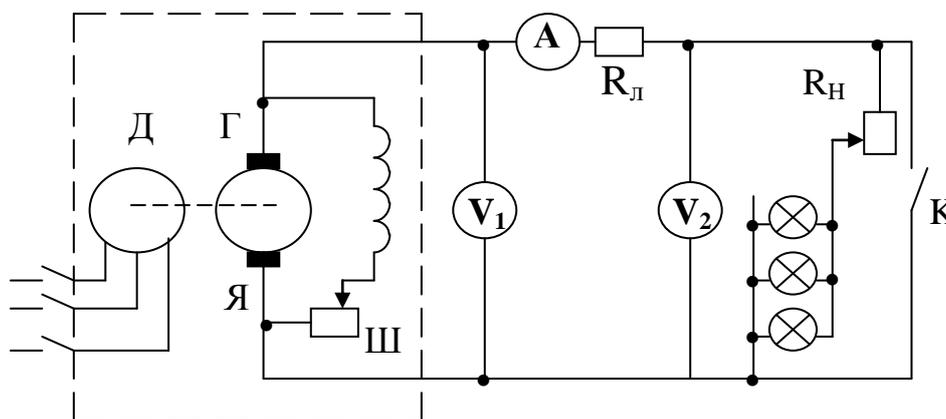


Рис. 2.1.

### Программа работы

1. Исследование работы линии электропередачи при различных режимах работы от холостого хода ( $R_H = \infty$ ) до короткого замыкания ( $R_H = 0$ ) при напряжении  $U_1 = \text{const}$ .

*Примечания.* 1. Величина напряжения  $U_1$  задается преподавателем. 2. Произвести измерения для 7÷8 различных значений сопротивления  $R_H$ , причем значения токов при изменении нагрузки от режима холостого хода до режима короткого замыкания брать примерно через равные интервалы.

Данные измерений внести в табл. 2. 1.

2. По данным п. 1 вычислить значение мощности  $P_1$ , отдаваемой генератором, мощности  $P_2$ , потребляемой приемником, сопротивления приемника  $R_H$ , коэффициента полезного действия передачи энергии  $\eta$ , потери напряжения в линии  $I R_L$  и потери мощности в линии  $I^2 R_L$ .

Результаты расчетов внести в табл. 2. 1.

Таблица 2. 1

Данные опыта			Данные расчета					
$U_1$	$U_2$	$I$	$R_n$	$P_1$	$P_2$	$I R_{л}$	$I^2 R_{л}$	$\eta$
В	В	А	Ом	Вт	Вт	В	Вт	%

3. По данным п. 2 построить кривые

$$U_2 = f(I); P_1 = f(I); \eta = f(I).$$

4. Исследование работы линии электропередачи при постоянном напряжении  $U'_1$ , в два раза меньшем, чем  $U_1$ .

*Примечание.* Данные наблюдений и результаты вычислений внести в табл. 2.2, аналогичную табл. 2. 1. Построить кривые, аналогичные кривым п. 3, желательно в тех же осях другим цветом.

5. По данным п. 2 и 4 построить кривые  $\eta = f(P_2)$  при  $U_1$  и  $U'_1 = 0,5 U_1$ . (Кривые желательно строить в одних осях).

### Вопросы

1. Почему передача энергии по длинным линиям производится при высоком напряжении?
2. Найти аналитически значение тока нагрузки, при котором мощность  $P_2$  достигает наибольшего значения.

### Литература

1. Л. 1, § 1.9.
2. Л. 4, § 1.26.

## Лабораторная работа № 3

### Простая цепь однофазного переменного тока

**Цель работы.** 1. Изучение законов Кирхгофа в применении к цепям переменного тока. 2. Построение векторных диаграмм токов и напряжений. 3. Определение параметров цепи переменного тока. 4. Приобретение навыков составления электрических схем и измерения электрических величин в однофазных цепях переменного тока.

#### Пояснение к работе

По цепи, состоящей из последовательно соединенных R-, L- и C-элементов, включенных на синусоидально изменяющееся напряжение

$$u = U_m \sin (\omega t + \psi_u),$$

проходит ток

$$i = I_m \sin (\omega t + \psi_u - \varphi),$$

где

$$I_m = U_m / Z = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1 / \omega C)^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = (\omega L - 1 / \omega C) / R; - 90 \leq \varphi \leq + 90.$$

Соотношение является уравнением закона Ома для амплитудных значений напряжения и тока. Закон Ома для действующих значений напряжения и тока имеет вид

$$I = U / Z = U / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1 / \omega C)^2},$$

где

$X_L = \omega L$  – индуктивное сопротивление;

$X_C = 1 / \omega C$  – емкостное сопротивление;

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1 / \omega C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \text{ – полное сопротивление.}$$

Обращаем внимание на то, что  $X_L$  и  $X_C$  – положительные величины, а реактивное сопротивление  $X$  может быть как положительным (при индуктивном характере ветви, когда  $X_L > X_C$ ), так и отрицательным (при емкостном характере ветви, т.е.  $X_L < X_C$ ).

## Программа работы

1. Начертить электрическую схему последовательно – параллельного соединения элементов в электрической цепи, заданной преподавателем. Использовать в схеме минимально необходимое число измерительных приборов, такое, чтобы можно было построить векторные диаграммы токов и напряжений.
2. После проверки схемы преподавателем собрать схему на стенде.
3. Включить ее в сеть и произвести измерения. Показатели приборов занести в таблицу.
4. По опытным данным построить векторную диаграмму токов и напряжений. Указать на векторной диаграмме активные и реактивные составляющие токов и напряжений.
5. По полученной диаграмме токов (для одного из узлов) построить мгновенные значения токов.
6. Используя полученную векторную диаграмму, определить электрические параметры всех элементов цепи, эквивалентные активное и реактивное сопротивления всей схемы и параметры эквивалентной цепи. Построить треугольники сопротивлений и проводимостей. Используемые при определении параметров цепи, формулы и порядок расчета привести в отчете.
7. Построить изменение мгновенной мощности всей цепи в зависимости от времени. Определить активную, реактивную и полную мощности.

## Вопросы

1. Законы Кирхгофа для мгновенных и действующих значений синусоидальных величин.
2. Сопротивления в цепях переменного тока.

## Литература

1. Л. 1, § 2.12, 2.13, 2.14.
2. Л. 2, § 2.11, 2.12, 2.13.
3. Л. 4, § 3.11, 3.12.
4. Л. 5, § 2.4, 2.5.

## Лабораторная работа № 4

### Исследование цепи, содержащей индуктивно связанные катушки

**Цель работы.** 1. Научиться определению параметров и построению векторных диаграмм цепей, состоящих из различным образом соединенных

катушек. 2. Выяснить влияние взаимной индукции на и параметры цепи, а также величину тока и угол сдвига фаз между током и напряжением.

### Пояснения к работе

При отсутствии индуктивной связи эквивалентное сопротивление последовательно соединенных катушек

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2},$$

где  $R_{\text{ЭКВ}}^2$  и  $X_{\text{ЭКВ}}^2$  определяются как суммы активных и реактивных сопротивлений

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{ЭКВ}} &= \sum R_k; \\ X_{\text{ЭКВ}} &= \sum X_k = \sum \omega L_k \end{aligned} \right\}.$$

При параллельном соединении подобным образом складываются проводимости.

Наличие взаимной индуктивности усложняет эти выражения и изменяет соотношение токов и напряжений в цепи. Так, при последовательном соединении двух индуктивно связанных катушек эквивалентное активное сопротивление

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2,$$

а эквивалентное реактивное сопротивление

$$X_{\text{ЭКВ}} = \omega L_{\text{ЭКВ}},$$

где

$$L_{\text{ЭКВ}} = L_1 + L_2 + 2M = L_{\text{согл}}$$

при согласном включении катушек и

$$L_{\text{ЭКВ}} = L_1 + L_2 - 2M = L_{\text{встр}}$$

при встречном включении.

При параллельном соединении индуктивно связанных катушек

$$Z_{\text{ЭКВ}} = (Z_1 Z_2 - Z_M^2) / (Z_1 + Z_2 - 2Z_M),$$

где

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1,$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2,$$

$$Z_M = \pm j\omega M.$$

Знак “плюс” соответствует согласному включению катушек, “минус” – встречному.

### Схема электрической цепи

В работе используется схема, приведенная на рис. 4.1, которая при разных положениях  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  дает различные соединения катушек.

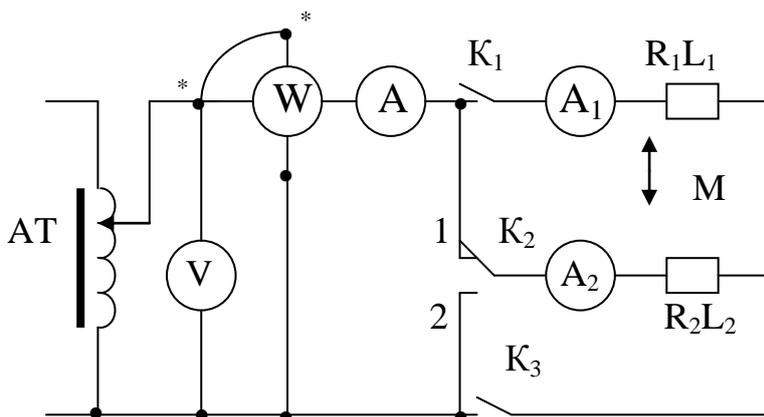


Рис. 4.1.

Регулировка напряжения на входе цепи производится автотрансформатором.

Схема собирается с учетом указанных на обеих катушках одноименных зажимов. Для перехода от согласного включения к встречному достаточно поменять местами зажимы одной из катушек.

Для проведения опытов без индуктивной связи используется та же схема, но катушки должны быть размещены достаточно далеко друг от друга или повернуты так, чтобы их плоскости были взаимно перпендикулярны.

### Программа работы

1. Определение параметров отдельных катушек по методу амперметра, вольтметра и ваттметра.

Результаты измерений и расчета внести в табл. 4.1.

2. Исследование цепи, состоящей из последовательно соединенных катушек, при согласном и встречном включении, а также при отсутствии индуктивной связи ( $M = 0$ ).

Для получения последовательного соединения переключатель  $K_2$  ставится в положение 2, ключ  $K_1$  замкнут,  $K_3$  разомкнут.

Результаты внести в табл. 4.2. По данным опыта определить взаимную индуктивность.

Таблица 4.1

№ катушки	Данные опыта			Данные расчета				Примечание
	U	I	P	Z	R	X	L	
	B	A	Вт	Ом	Ом	Ом	Г	
1								Ключи $K_1$ и $K_3$ замкнуты, $K_2$ разомкнут
2								Переключатель $K_2$ – в положении 1, ключ $K_3$ замкнут, $K_1$ разомкнут

Таблица 4.2

Включение катушек	Данные опыта			Данные расчета			
	U	I	P	$Z_{\text{ЭКВ}}$	$R_{\text{ЭКВ}}$	$X_{\text{ЭКВ}}$	$L_{\text{ЭКВ}}$
	B	A	Вт	Ом	Ом	Ом	Г
$M = 0$							
Согласное							
Встречное							

3. Построение векторных диаграмм при последовательном соединении катушек для трех рассмотренных случаев.

4. Исследование цепи при параллельном соединении катушек, для чего нужно замкнуть ключи  $K_1$  и  $K_3$ , а переключатель  $K_2$  поставить в положение 1. Данные внести в табл. 4.3.

5. Построение векторных диаграмм при согласном и встречном включении катушек и при отсутствии индуктивной связи.

Включение катушек	Данные опыта				
	U	I	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	P
	В	А	А	А	Вт
М = 0					
Согласное					
Встречное					

### Основные соотношения

Параметры катушек, измеряемые по методу амперметра, вольтметра и ваттметра, определяются по формулам:

$$R = P / I^2; Z = U / I; X = \sqrt{Z^2 - R^2}; L = X / \omega.$$

Те же соотношения справедливы и для определения эквивалентных сопротивлений при более сложных соединениях.

Взаимная индуктивность может быть определена по данным опытов при последовательном соединении катушек как

$$M = (L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}}) / 4.$$

### Методические указания

1. Построение векторной диаграммы при параллельном соединении катушек удобнее начинать с тока в одной из катушек (I<sub>1</sub> или I<sub>2</sub>). Положение двух остальных токов нетрудно найти, построив треугольник токов.

2. Диаграмма напряжений во всех случаях должна строиться топографической.

### Вопросы

1. Какие зажимы называются одноименными? Как их определить экспериментально?

2. В каком случае входное сопротивление цепи будет больше: при последовательном встречном или последовательном согласном соединении индуктивно связанных катушек?

3. Как определить  $X_M = \omega M$ , если известны реактивные сопротивления цепи при согласном ( $X_{\text{сог}}$ ) и встречном ( $X_{\text{встр}}$ ) соединениях?

### Литература

1. Л. 1, § 2.21.
2. Л. 3, § 7-12, 8-2, 8-3, 10-3, 10-4.

## Лабораторная работа № 5

### Исследование резонанса при последовательном соединении (Резонанс напряжений)

**Цель работы.** Изучение и экспериментальное исследование явления резонанса напряжений.

#### Пояснение к работе

Резонансом называется такой режим цепи, при котором входной ток совпадает по фазе с входным напряжением, несмотря на наличие в цепи реактивных сопротивлений. Резонанс, возникающий в цепи с последовательным соединением приемников, объясняется взаимной компенсацией индуктивного и емкостного напряжений и называется резонансом напряжения

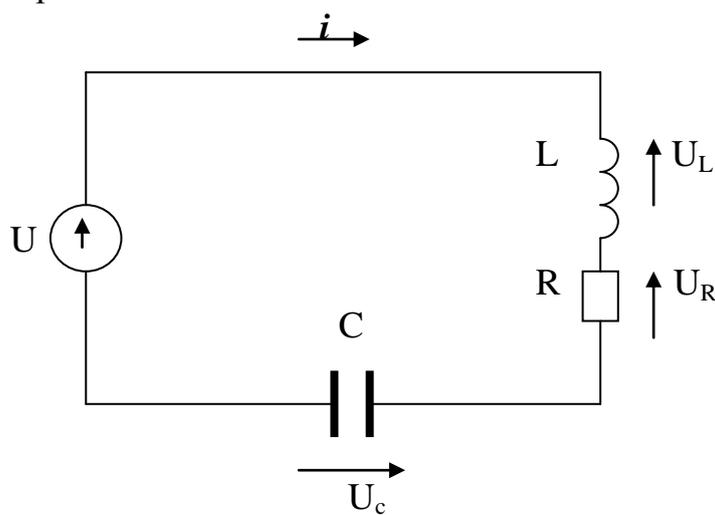


Рис. 5.1

Если к цепи, изображенной на рис. 5.1, приложено синусоидальное напряжение

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то мгновенное значение тока равно

$$i = (U_m / (\sqrt{R^2 + (\omega L - 1 / \omega C)^2}) \sin(\omega t - \varphi) = I \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi),$$

где

$$\varphi = \arctg X / R; X = \omega L - 1 / \omega C,$$

откуда видно, что ток будет совпадать по фазе с приложенным напряжением при условии

$$\omega L - 1 / \omega C = 0.$$

Таким образом, при резонансе напряжений входное реактивное сопротивление равно нулю, и кажущееся сопротивление принимает наименьшую возможную при данном активном сопротивлении цепи величину. Амплитуда тока достигает при этом наибольшего значения.

Из зависимости  $\omega L - 1 / \omega C = 0$  следует, что резонанса напряжений можно достичь, изменяя или частоту, или индуктивность, или емкость.

При резонансе падения напряжения на индуктивности и емкости равны между собой и могут превышать напряжение, приложенное к цепи, если волновое сопротивление контура  $\rho$  больше его активного сопротивления, то есть, если

$$\rho = \sqrt{L / C} > R.$$

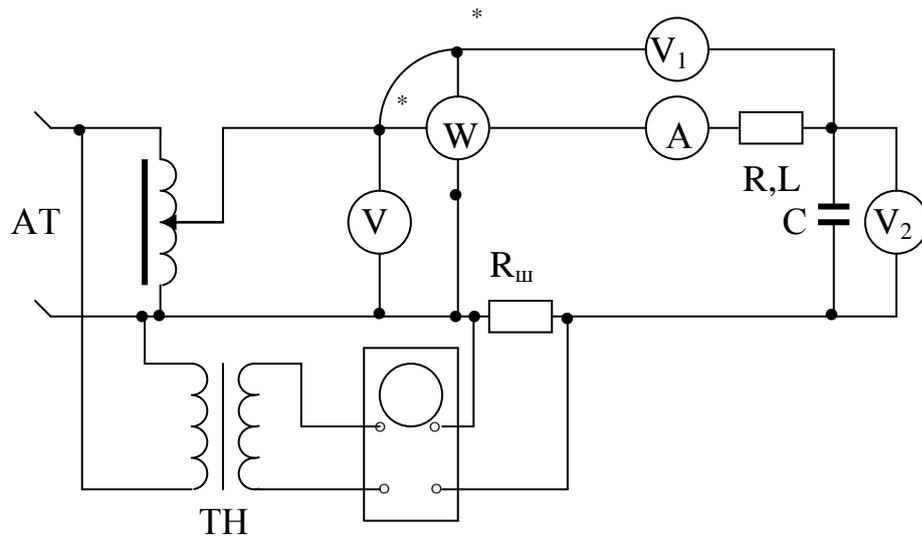
### Схема электрической цепи

В настоящей работе используется электрическая цепь, схема которой изображена на рис. 5.2.

Для изменения напряжения, подводимого к цепи, используется автотрансформатор АТ. С целью наблюдения изменения кривых тока и напряжения в цепь включен двулучевой катодный осциллограф ОСЦ. Для получения кривой напряжения к осциллографу подается напряжение, получаемое на активном сопротивлении  $R_{ш}$ .

При использовании однолучевого осциллографа на его вход подается выходное напряжение автоматического переключателя, на два входа которого поданы напряжения с ТН и  $R_{ш}$ .

Ваттметр включен таким образом, чтобы в результате измерения параметров индуктивной катушки  $L$ ,  $R$  вошли сопротивления амперметра  $A$ , последовательной обмотки ваттметра  $W$  и сопротивление  $R_{ш}$ . В цепь включен также конденсатор переменной емкости  $C$ , напряжение на котором измеряется электростатическим вольтметром  $V_2$ .



осц  
Рис. 5.2

### Программа работы

1. Измерение параметров индуктивной катушки при помощи амперметра, вольтметра и ваттметра и вычисление емкости конденсатора, соответствующей резонансу при  $\omega = 314$  1/с.

*Примечание.* Для измерения параметров катушки целесообразно использовать схему рис.6.2, временно закоротив конденсатор и отключив V на входе цепи.

Данные опыта и расчета внести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Данные опыта			Данные расчета				
U	I	P	Z	R	X	L	C <sub>рез</sub>
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Г	мкФ

2. Исследование цепи рис. 5.2 при изменении емкости.

*Примечание.* 1. напряжение сети поддерживается постоянным и равным 30-40 В.  
2. Должны быть получены показания при 7-9 различных значениях емкости, причем 3-4 из них при  $C < C_{рез}$  и столько же при  $C > C_{рез}$ .

Результаты внести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

С	Данные опыта						Данные расчета			
	I	U <sub>c</sub>	U <sub>k</sub>	P	cosφ	φ	I	tgφ	φ	P
мкФ	А	В	В	Вт	-	град	А	-	град	Вт

3. Построение кривых I, U<sub>c</sub>, U<sub>k</sub>, P, φ по данным опыта и расчетных кривых I, P и φ в функции от емкости.

*Примечание.* Расчетные и экспериментальные кривые строить в одних осях координат.

4. Построение по опытным данным векторных диаграмм для трех значений емкости, соответствующих φ > 0; φ = 0; φ < 0.

5. Вычисление волнового сопротивления контура при резонансе.

### Основные соотношения

Вывод формул для определения величин I, P и φ, выраженных в зависимости от приложенного напряжения и параметров цепи, должен быть произведен самостоятельно при подготовке к работе.

Величина емкости, соответствующая резонансу, определяется из выражения

$$C_{\text{рез}} = 1 / \omega^2 L.$$

Параметры индуктивной катушки, включая и параметры сопротивления R<sub>ш</sub>, амперметра и токовой обмотки ваттметра, определяются по формулам

$$Z = U / I; R = P / I^2; X_k = \omega L = \sqrt{Z^2 - R^2}; L = X_k / \omega.$$

Волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{L / C}.$$

### Вопросы

1. Что такое резонанс напряжения?
2. Как определяется знак угла сдвига фаз φ?
3. Как можно достичь резонанса напряжений?

## Литература

1. Л. 1, § 2.12.
2. Л. 3, § 9-1.
3. Л. 5, § 3.2.

## Лабораторная работа № 6

### Исследование резонанса при параллельном соединении

#### (Резонанс токов)

**Цель работы.** Изучение и экспериментальное исследование явлений резонанса токов.

#### Пояснение к работе

Резонансом называется такой режим цепи, когда входной ток совпадает по фазе с входным напряжением, несмотря на наличие в цепи реактивных сопротивлений. При взаимной компенсации реактивных составляющих токов в параллельно включенных элементах цепи возникающий резонанс называется резонансом токов.

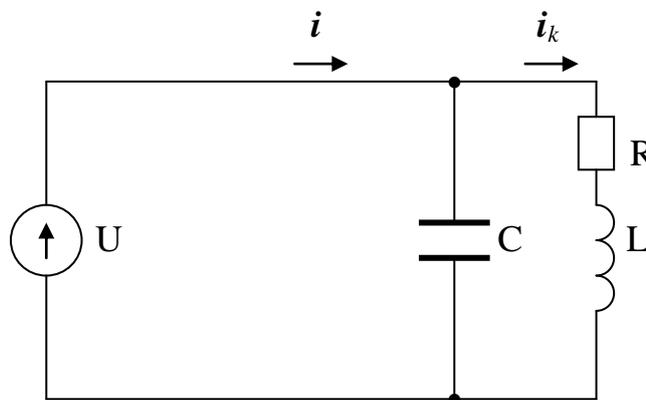


Рис. 6.1

Если к цепи, изображенной на рис. 6.1, приложено напряжение

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то ток равен

$$i = U_m \sqrt{g^2 + b^2} \sin(\omega t - \varphi) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi),$$

где

$$\varphi = \arctg(b / g); g = R / (R^2 + (\omega L)^2); b = (\omega L / (R^2 + (\omega L)^2)) - \omega C.$$

Из приведенного выражения видно, что ток  $i$  будет совпадать по фазе с приложенным напряжением при условии  $b = 0$  или

$$(\omega L / (R^2 + (\omega L)^2)) - \omega C = 0.$$

Таким образом, при резонансе токов входная реактивная проводимость цепи равна нулю, а полная проводимость имеет наименьшее значение.

При резонансе реактивные составляющие токов в параллельных ветвях равны между собой и могут во много раз превышать ток  $i$  в неразветвленной части цепи, если волновое сопротивление  $\rho$  контура больше его активного сопротивления, т.е. если

$$\rho = \sqrt{L / C} > R$$

### Схема электрической цепи

В настоящей работе используется электрическая цепь, схема которой изображена на рис. 6.2.

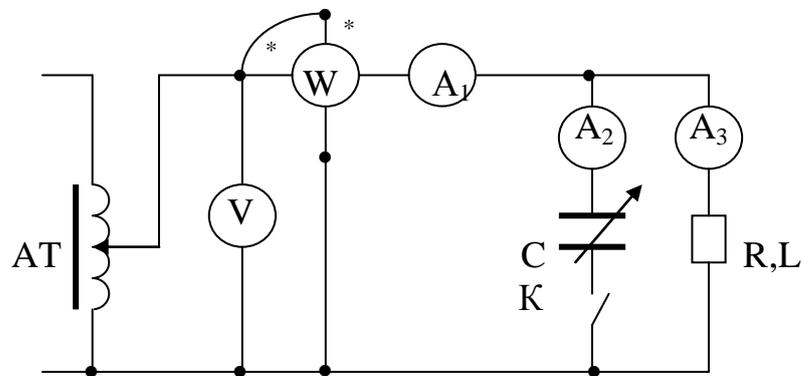


Рис. 6.2

Питание подается от сети через автотрансформатор, который позволяет установить требуемое напряжение на входе цепи. Индивидуальная катушка с параметрами  $L$  и  $R$  и конденсатор переменной емкости  $C$  включены параллельно. Изменением емкости  $C$  можно добиться резонанса токов, который устанавливается по наименьшему показанию амперметра  $A_1$ .

## Программа работы

1. Измерение параметров индивидуальной катушки при помощи амперметра, вольтметра и ваттметра и вычисление емкости конденсатора, соответствующей резонансу при  $\omega = 314$  1/с.

Данные опыта и расчета заносятся в табл. 6.1.

*Примечание.* Для измерения параметров катушки ключ в схеме рис. 6.2 следует разомкнуть.

2. Исследование цепи рис. 7.1 при изменении емкости  $C$ .

*Примечание.* 1. Напряжение на входе схемы поддерживается постоянным (рекомендуется 100-120 В). 2. Должны быть получены показания при 7-9 различных значениях емкости, причем 3-4 из них при  $C < C_{рез}$  и столько же при  $C > C_{рез}$

Результаты внести в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Данные опыта			Данные расчета				
U	I	P	Z	R	$X_k$	L	$C_{рез}$
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Г	мкФ

Таблица 6.2

C	U	I	$I_k$	$I_c$	P	$\cos\phi$	$\phi$	Примечание
мкФ	В	А	А	А	Вт	-	град	
								Экспериментальные данные
								Расчетные данные

3. Построение кривых  $I$ ,  $I_k$ ,  $I_c$ ,  $P$  и  $\phi$  по опытными данным и расчетных кривых  $I$ ,  $P$  и  $\phi$  в функции от емкости  $C$ .

*Примечание.* Данные для построения расчетных кривых внести в табл. 6.2.

4. Построение по данным опыта векторных диаграмм для трех значений емкости, соответствующих  $\varphi > 0$ ;  $\varphi = 0$ ;  $\varphi < 0$ .

### Основные соотношения

Вывод аналитических выражений величин  $I$ ,  $P$  и  $\varphi$  должен быть произведен самостоятельно при подготовке к работе.

Величина емкости, соответствующая резонансу, определяется из выражения

$$C_{\text{рез}} = L / (R^2 + (\omega L)^2).$$

Параметры индуктивной катушки, включая сопротивления амперметра и последовательной цепи ваттметра, определяют по формулам

$$Z = U / I; R = P / I^2; X_k = \omega L = \sqrt{Z^2 - R^2}; L = X_k / \omega.$$

### Вопросы

1. Что такое резонанс токов?
2. Как определяется знак угла  $\varphi$ ?
3. Как можно достичь резонанса токов?

### Литература

1. Л. 1, § 2.13.
2. Л. 3, § 9-3.
3. Л. 5, § 3.3.

## Лабораторная работа № 7

### Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой

**Цель работы.** Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой, с нулевым проводом и без него, при симметричной и несимметричной нагрузках.

### Пояснение к работе

При соединении трехфазной цепи звездой линейный ток равен фазному, а линейное напряжение равно разности фазных напряжений, например:

$$U_{AB} = U_a - U_b.$$

В частном случае, когда цепь симметрична,  $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$ .

Несимметричная нагрузка в цепи без нулевого провода вызывает появление напряжения между нейтральными точками приемника и генератора, что приводит к несимметрии фазных напряжений у приемника. Если к сети трехфазного тока подключить приемник, состоящий из катушки индуктивности или конденсатора и двух активных сопротивлений, то по смещению нейтральной точки можно определить порядок следования фаз. Подобное устройство, состоящее из конденсатора и двух ламп накаливания, используется в настоящей работе в качестве фазоуказателя.

В трехфазных цепях с нулевым проводом несимметрия нагрузки вызывает ток в нулевом проводе, напряжения же фаз приемника остаются практически симметричными.

### Схема электрической цепи

В настоящей работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 7. 1. Питание цепи осуществляется от сети трехфазного тока напряжением 127 или 220 В, которая практически симметрична. Рубильник в нулевом проводе N дает возможность исследовать цепь с нулевым проводом и без последнего. Тумблеры K на ламповых реостатах позволяют уменьшать, увеличивать или отключать нагрузку в фазе.

### Программа работы

#### *А. Исследование цепи без нулевого провода*

1. Определение порядка следования фаз сети при помощи емкостного фазоуказателя.

2. Снятие показаний приборов при одинаковой нагрузке во всех фазах и проверка получающегося при этом отношения  $U_{л} / U_{ф}$ .

3. Исследование цепи при неравномерной нагрузке, создаваемой путем изменения нагрузки одной из фаз, для случаев:

- а) уменьшения активной нагрузки,
- б) увеличения активной нагрузки,
- в) отключения нагрузки,
- г) замыкания фазы накоротко,
- д) включения конденсатора,
- е) включения катушки индуктивности.

Результаты измерений по п. 2 и 3 внести в табл. 7. 1.

4. Построение векторных диаграмм, соответствующих случаям нагрузки п. 3

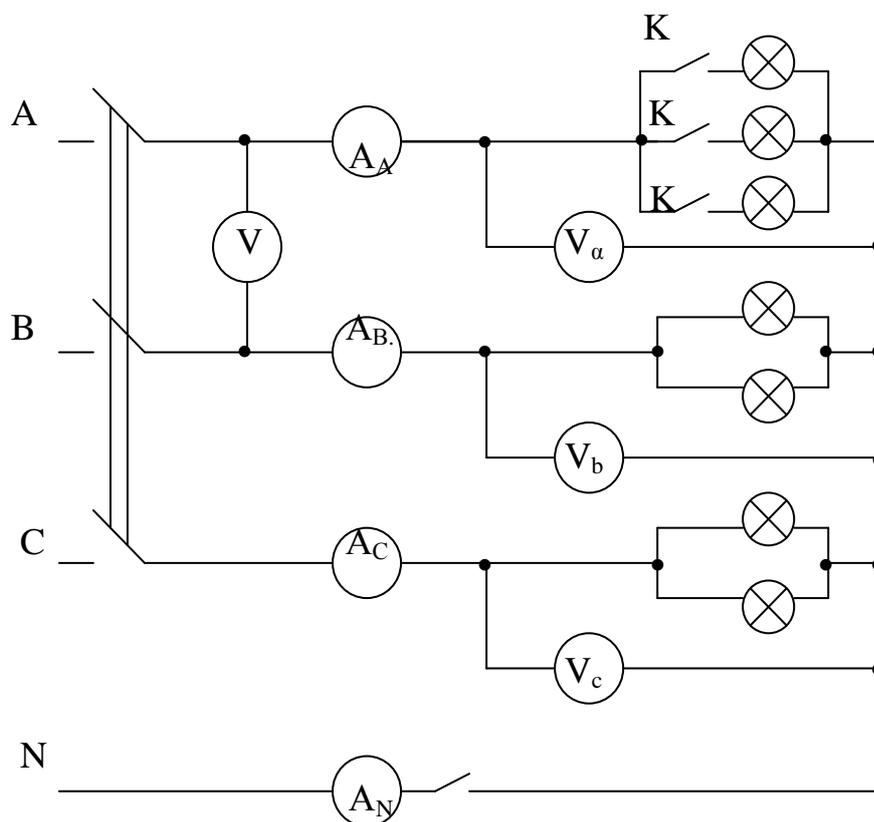


Рис. 7.1.

*Б. Исследование цепи при наличии нулевого провода*

5. Исследование цепи при наличии нулевого провода при равномерной и неравномерной нагрузках, создаваемой путем изменения нагрузки одной из фаз, для случаев, указанных в п. 2 и 3, за исключением опыта короткого замыкания.

Результаты измерений по п. 6 также внести в табл.7.1.

6. Построение векторных диаграмм, соответствующих случаям нагрузки п. 6, и определение из диаграммы тока в нулевом проводе.

**Методические указания**

1. Определение порядка следования фаз проводится по полностью собранной схеме рис. 7.1 при емкостной нагрузке фазы А. При этом целесообразно попутно снять показания приборов при наличии нулевого провода и без него.

2. При определении порядка следования фаз с помощью емкостного фазоуказателя следует иметь в виду, что при прямом порядке следования фаз лампы, включенные в фазу В, горят ярко, а лампы фазы С – тускло.

3. Построение диаграмм при отсутствии нулевого провода следует начинать с общего для всех диаграмм треугольника линейных напряжений.

Таблица 7. 1

Показания приборов							$I_N$ из вектор- ной диаграм- мы	$U_{AB} / U_\alpha$	$U_{AB} / U_b$	$U_{AB} / U_c$	Характер нагрузки фазы А	Примечание
$U_\alpha$	$U_b$	$U_c$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$						
В	В	В	А	А	А	А						
												Без нулево- го провода
												С нулевым проводом

### Вопросы

1. Как влияет наличие нулевого провода на асимметрию фазовых напряжений при неравномерной нагрузке?
2. Как определить из векторной диаграммы параметры конденсатора и катушки? При определении угла  $\varphi_{кат}$  воспользоваться тем, что сумма линейных токов в трехпроводной цепи равна нулю.
3. Соотношения между  $I_\Delta$  и  $I_\phi$ ,  $U_\Delta$  и  $U_\phi$  в симметричном приемнике?

### Литература

1. Л. 1, § 3.5.
2. Л. 3, § 13-2, 13-4, 13-5.
3. Л. 4, § 7.8, 7.11, 7.16.

## Лабораторная работа № 8

### Исследование цепи трехфазного тока, соединенной треугольником

**Цель работы.** Исследование цепи трехфазного тока, соединенной треугольником, при симметричной и несимметричной нагрузках.

## Пояснение к работе

При соединении трехфазной цепи треугольником линейное напряжение равно фазному, а линейный ток равен разности фазовых токов, например:

$$I_A = I_{ab} - I_{ac}.$$

В частном случае, когда цепь симметрична,  $I_L = \sqrt{3} I_\phi$ . Измерение мощности трехфазной симметричной цепи можно произвести, измерив мощность одной фазы. Мощность всей цепи определится из равенства:

$$P = 3P_\phi,$$

где  $P_\phi$  – мощность одной фазы.

В несимметричных трехфазных цепях мощность определяется по методу двух ваттметров. Мощность всей цепи

$$P = P_1 + P_2,$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - показания первого и второго ваттметров.

## Схема электрической цепи

В настоящей работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 8.1. Питание осуществляется от сети трехфазного тока напряжением 220 или 127 В, которая практически симметрична. Для измерения мощности используется метод двух ваттметров. Тумблеры К на ламповых реостатах позволяют уменьшать, увеличивать или отключать нагрузку в фазе.

## Программа работы

1. Определение порядка следования фаз сети при помощи индукционного фазоуказателя, действие которого основано на использовании вращающегося магнитного поля.

2. Определение показаний приборов при симметричной нагрузке и проверке отношений  $I_L / I_\phi$ . Сравнение значений активной мощности, полученных из опыта и по формуле

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi.$$

3. Исследование трехфазной несимметричной цепи, соединенной треугольником, в следующих случаях:

- а) при уменьшении нагрузки одной из фаз,
- б) при увеличении нагрузки той же фазы,
- в) при обрыве одного из линейных проводов и одинаковой нагрузке фаз,

- г) при обрыве в одной из фаз,
- д) при включении в одну из фаз емкости,
- е) при включении в ту же фазу индуктивности.

Результаты измерений по п. 2 и 3 внести в табл. 8.1.

4. Построение векторных диаграмм напряжений и токов для всех случаев симметричной и несимметричной нагрузки.

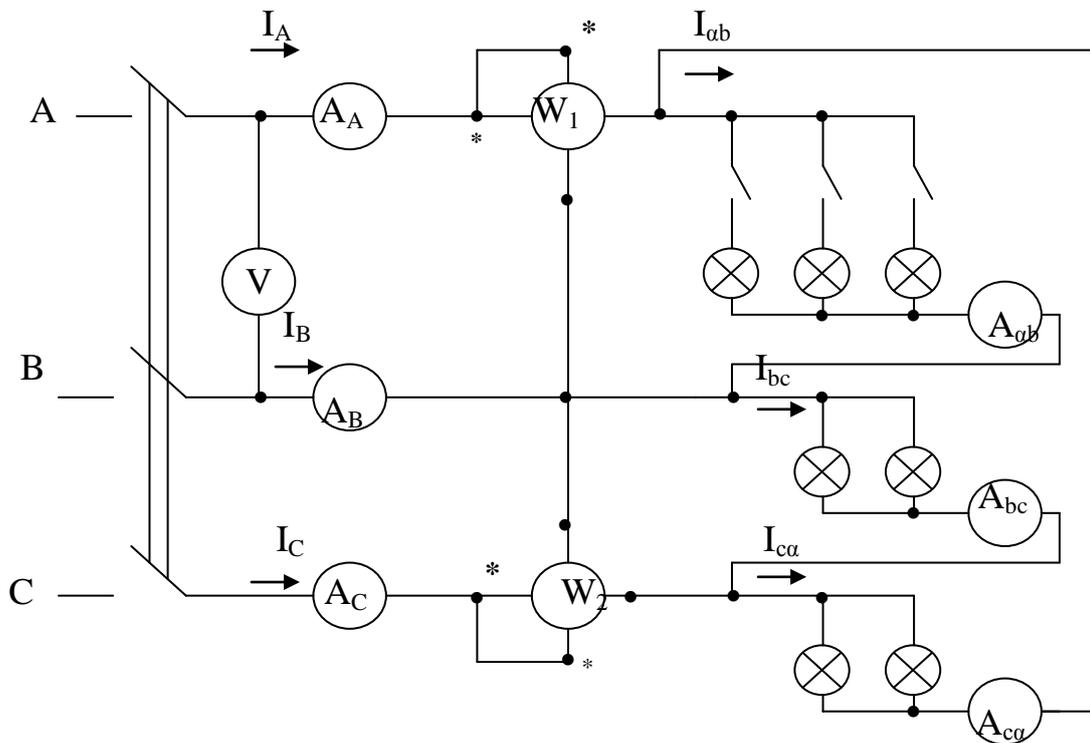


Рис. 8.1

Таблица 8.1

$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$P_1$	$P_2$	$P$	Характер нагрузки в фазе
A	A	A	A	A	A	Вт	Вт	Вт	

## Методические указания

1. При подсоединении ваттметров необходимо обратить внимание на правильность включения генераторных зажимов, отмеченных знаком \*. При угле сдвига фаз между током и напряжением больше  $60^0$  один из ваттметров дает отклонение влево от нулевой отметки шкалы. В этом случае для получения показания необходимо изменить направление ток в одной из цепей соответствующего ваттметра, что и осуществляется при помощи переключателя в параллельной цепи ваттметра, расположенного на верхней крышке прибора. Указатель переключателя имеет плюс (+) и минус (-). При нормальном включении ваттметра указатель переключателя должен располагаться на знаке “плюс”. При необходимости перехода указатель переключается в положение “минус” и соответствующее показания ваттметра должны быть взяты также со знаком “минус”.

2. Построение векторных диаграмм удобнее начинать с лучевой диаграммы линейных напряжений.

### Вопросы

1. Почему при симметричной нагрузке, при сдвиге фаз между напряжением и током больше  $60^0$  стрелка одного из ваттметров отклоняется влево от нулевой отметки шкалы?

2. Соотношения между  $I_{л}$  и  $I_{ф}$ ,  $U_{л}$  и  $U_{ф}$  в симметричном приемнике при связывании электрических цепей треугольником?

### Литература

1. Л. 1, § 3.6.
2. Л. 4, § 7.9; 7.13.

## Лабораторная работа № 9

### Определение магнитных проводимостей зазоров в электротехнических устройствах

**Цель работы.** Экспериментальное и теоретическое определение магнитных проводимостей зазоров между ферроэлементами магнитных цепей электротехнических устройств и оценка погрешностей при их определении.

### Пояснение к работе

Во многих устройствах автоматики и информационно – измерительной техники часто появляются задачи расчета магнитных цепей, сводящиеся к

теоретическому определению магнитных проводимостей воздушных зазоров между ферроэлементами, показанными на рис. 9.1, с учетом магнитных потоков выпучивания.

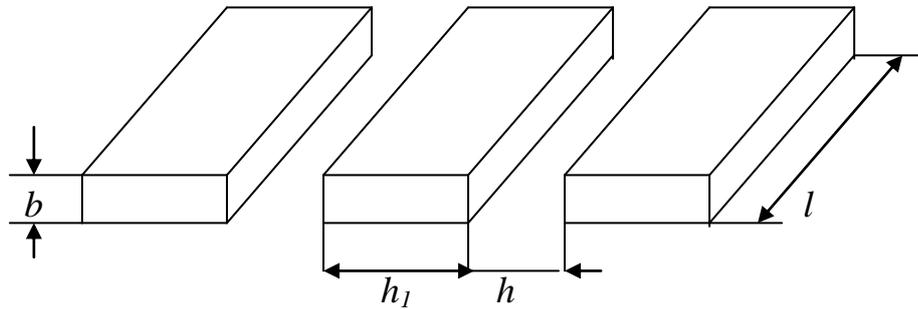


Рис. 9.1

На рис. 9.2 показаны часть магнитной цепи и картина прохождения по ней магнитного потока  $\Phi$ .

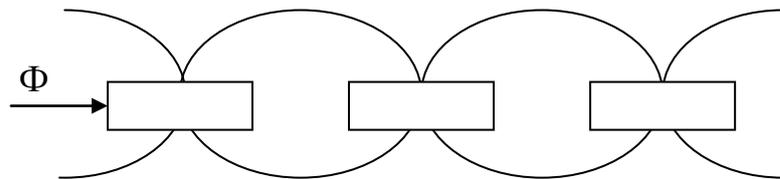


Рис. 9.2

В работе необходимо экспериментально и теоретически определить магнитную проводимость  $G$ : воздушного промежутка между одной парой ферроэлементов при  $l \gg b$  (здесь  $l$  и  $b$  – длина и толщина ферроэлемента) и оценить точность расчета по формуле

$$\gamma = ((G_{it} - G_{i3}) / G_{i3}) 100\%$$

Проводимость  $G_{it}$  равна  $G_{it} = gl$ , где  $g$  – погонная магнитная проводимость, определяемая по формуле А. М. Плахтиева

$$g = \sqrt{(1 / h)(\lambda h_1 + \tau b)}$$

Здесь  $\lambda$  – угловой коэффициент прямой,

$\tau$  – отрезок, отсекаемый прямой на оси коэффициента  $K_g$ , зависящего от  $h_1 / b$ .

Экспериментально магнитная проводимость  $G_{i3}$  определяется из формул для магнитного потока  $\Phi$ , созданного м. д. с.

$$F_B = w_B I_B,$$

где  $F_B$  – м. д. с. возбуждения;

$w_B$  – число витков в обмотке возбуждения;

$I_B$  – ток возбуждения, протекающей по  $w_B$ .

в виде

$$\Phi = F_B / Z_M, \quad (1)$$

где  $Z_M$  – магнитное сопротивление магнитопровода, равное

$$Z_M = R_{\text{мст}} + R_{\text{мв}},$$

где в свою очередь

$R_{\text{мст}}$  – магнитное сопротивление части магнитопровода, выполненной из стали;

$R_{\text{мв}}$  – магнитное сопротивление части магнитопровода из воздуха,

а также в виде

$$\Phi = E_{\text{и}} / \omega w_{\text{и}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{и}}$  – э. д. с., индуктируемая в измерительной обмотке  $w_{\text{и}}$ ;

$\omega$  – круговая частота, равная  $2\pi f$ ,

Здесь  $f$  – обычная частота.

Приравнявая (1) и (2) и учитывая, что  $G_B = 1 / R_{\text{мв}}$  и  $G_{\text{гэ}} = (n - 1) G_B$ , где  $n$  – число ферроэлементов, получим

$$G_{\text{гэ}} = (n - 1)(E_{\text{и}} / (\omega w_{\text{и}} w_B I_B - R_{\text{мст}}E))$$

### Схема электрической цепи

Установка (рис. 9.3) включает в себя П – образный магнитопровод 1, на основании которого намотана обмотка возбуждения 2, подключенная через амперметр 3, автотрансформатор 4 к сети переменного тока. Между стержнями П – образного магнитопровода расположены на одинаковом расстоянии друг от друга ферроэлементы 5, представляющие собой прямоугольные призмы. На ферроэлементе, расположенном в центре воздушного зазора между стержнями П – образного магнитопровода, размещена точно на его середине измерительная обмотка 6 ( $w_{\text{и}}$ ). К выводам измерительной обмотки подключен электронный вольтметр 7.

### Программа работы

1. Уложить на подставке между стержнями магнитопровода заданное количество ферроэлементов с одинаковой величиной воздушного зазора между ними.

2. В центре между стержнями магнитопровода расположить ферроэлемент с измерительной обмоткой.

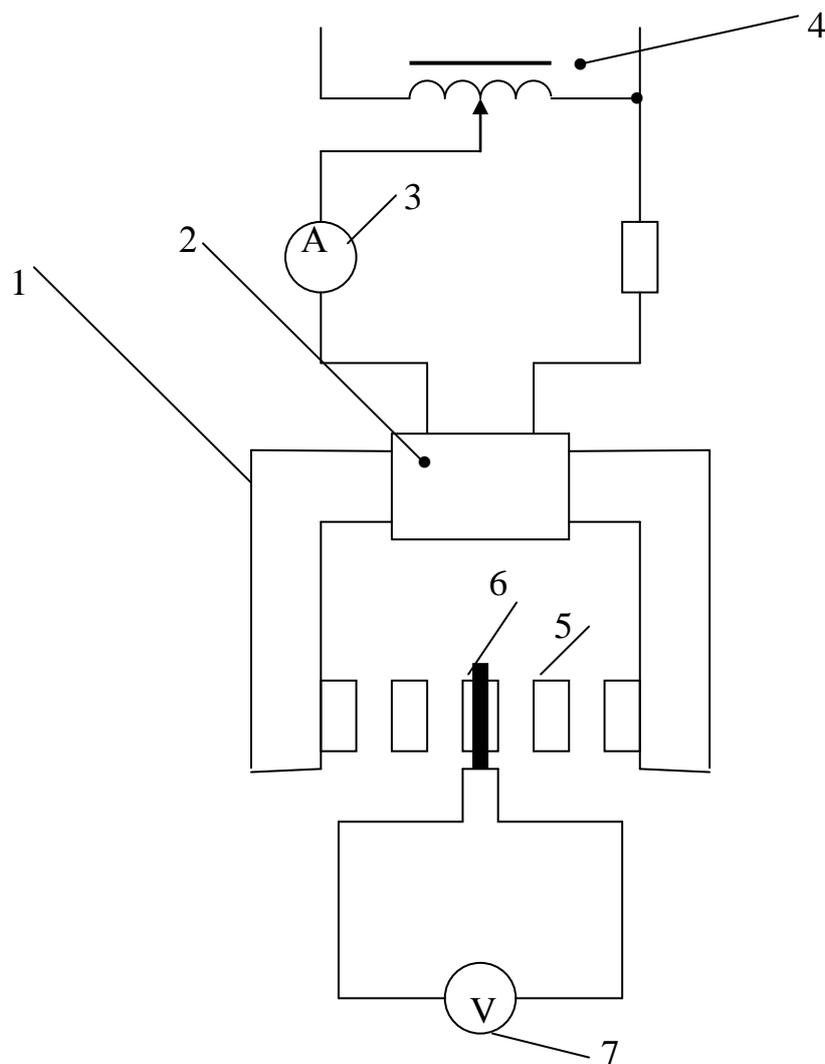


Рис. 9.3

3. К выводам измерительной обмотки подключить электронный вольтметр.

4. Собрать электрическую схему возбуждения.

5. Подать в схему ток возбуждения  $I_b$  величиной 1А.

6. Зафиксировать показание электронного вольтметра.

7. Измерения произвести не менее пяти раз.

8. Найти среднее значение э. д. с. на выходе измерительной обмотки.

9. По известным значениям тока возбуждения  $I_b = 1A$ , числа витков в обмотке возбуждения  $w_b = 68$  вит., габаритов установки и ферроэлемента, зазора между ферроэлементами  $h$ , количества ферроэлементов  $n$  и удельного магнитного сопротивления стали магнитопровода и стали ферроэлементов  $\rho$  и магнитной проницаемости  $\mu$  определить магнитные проводимости между одной парой ферроэлементов  $G_{it}$  и  $G_{iэ}$ .

10. Сравнить полученные результаты определения проводимостей  $G_{it}$  и  $G_{iэ}$  и найти погрешность в определении проводимости по приближенной формуле ее расчета, принимая за достоверную величину результат, полученный экспериментальным путем.

## Методические указания

1. Вольтметр, подключаемый к выходу измерительной обмотки, должен быть с большим входным сопротивлением.

2. Первый и последний из  $n$  ферроэлементов, расположенных между стержнями П – образного магнитопровода, должны плотно соприкасаться с стержнями.

### Вопросы

1. Почему в формуле для определения проводимости  $G_{i_3}$  стоит множитель  $(n - 1)$ ?

2. Что понимают под погонной магнитной проводимостью?

3. Что понимают под законом Ома для магнитной цепи?

4. Как должна располагаться измерительная обмотка на ферроэлементе?

### Литература

1. Л. 6, § 7.2.

## Лабораторная работа № 10

### Изучение подключений измерительных приборов и определение их постоянных

**Цель работы.** Ознакомление с обозначениями и устройством электромеханических измерительных приборов и изучение правил пользования и основных характеристик электромеханических амперметров, вольтметров и ваттметров.

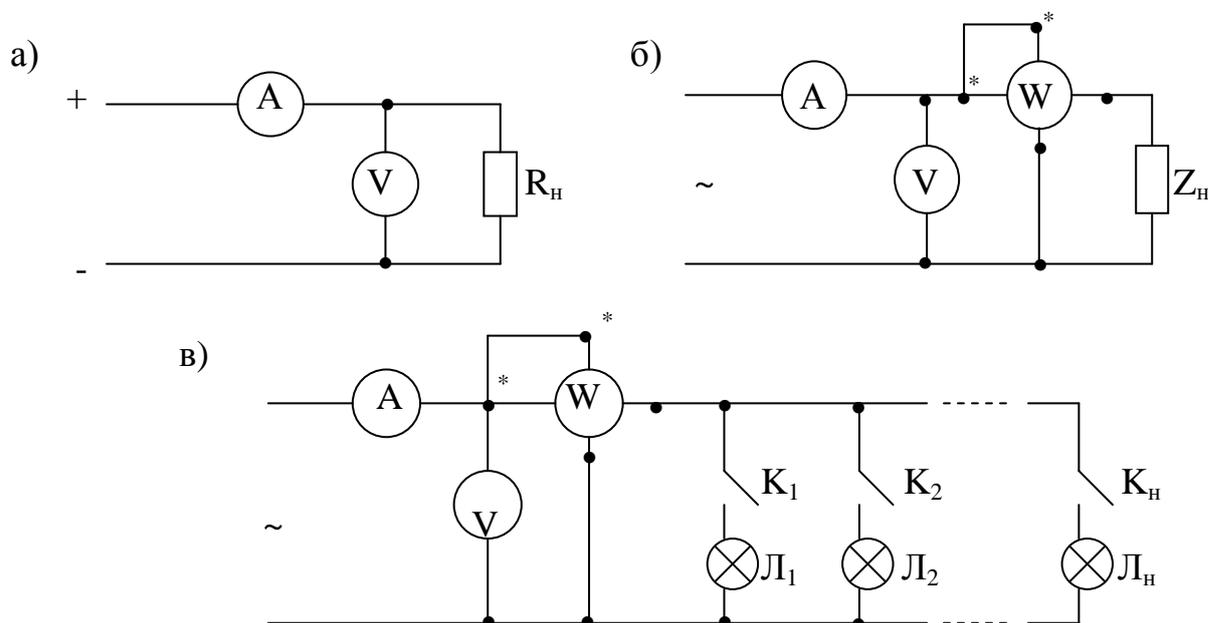
### Пояснения к работе

Существует множество электроизмерительных приборов, которые помогают контролировать и исследовать работу электрических цепей. В учебной лаборатории применяют только некоторые амперметры, миллиамперметры, вольтметры, ваттметры и др. Приборы бывают щитовые и переносные, предназначенные для измерения на постоянном или переносном токе. Они могут быть одно- и многопредельными и иметь различные конструктивные особенности.

По способу преобразования электромагнитной энергии в механическую приборы делят на несколько систем, основными из которых являются магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, индукционная, электростатическая, вибрационная, тепловая.

## Схема электрической цепи

В работе могут быть использованы следующие электрические схемы:



Обозначения на рисунках: А – амперметр, V – вольтметр, W – ваттметр,  $Z_{\text{н}}$  – нагрузка,  $L_1, L_2, \dots, L_{\text{н}}$  – в качестве нагрузки использованы лампы накаливания,  $K_1, K_2, \dots, K_{\text{н}}$  – выключатели.

## Программа работы

1. Детально ознакомиться с условными обозначениями и постоянными данными измерительных приборов: амперметров, вольтметров и ваттметров.
2. Переписать паспортные данные измерительных приборов, заполнив таблицу 10.1, и уделить внимание на деления шкал и пределы измерений.
3. Определить постоянные амперметра, вольтметра и ваттметра путем расчета.
4. Собрать схему (схема дается преподавателем) и показания приборов с учетом п. 3. записать в таблицу 10.2.

## Методические указания

При подсоединении ваттметров необходимо обратить внимание на правильность включения генераторных зажимов, отмеченных знаком \*. При угле сдвига фаз между током и напряжением больше  $60^\circ$  один из ваттметров дает отклонение влево от нулевой отметки шкалы. В этом случае для получения показания необходимо изменить направление тока в одной из

Таблица 10.1

Наименование прибора	Условное обозначение на схеме	Система	Предел измерений	Класс точности	Заводской номер	Примечание

Таблица 10.2

U		I		P		Примечание
дел.	В	дел.	А	дел.	Вт	

цепей соответствующего ваттметра, что и осуществляется при помощи переключателя в параллельной цепи ваттметра, расположенного на верхней крышке прибора. Указатель переключателя имеет плюс (+) и минус (-). При нормальном включении ваттметра указатель переключателя должен располагаться на знаке “плюс”.

### Вопросы

1. Какие условные обозначения бывают на электромагнитных и магнитоэлектрических амперметрах?
2. Какие условные обозначения бывают на электромагнитных и магнитоэлектрических вольтметрах?
3. Что такое предел измерения измерительных приборов?
4. Как можно изменять предел измерения?
5. Как определяются постоянные измерительных приборов: амперметра, вольтметра и ваттметра?
6. Как определяются постоянные ваттметра, если изменить предел тока в токовой обмотке ваттметра?
7. Как определяются постоянные ваттметра, если изменить предел напряжения в параллельной обмотке ваттметра?
8. Почему приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу, а электромагнитные и ферродинамические – неравномерную?

## Литература

1. Л. 7, § 2.1.
2. Л. 8, § 3.1, 3.2.

### Лабораторная работа № 11

## Проведение эксперимента по косвенным методам измерения электрических сопротивлений и индуктивности катушек

**Цель работы.** Ознакомление с косвенными методами измерения электрических величин и параметров и их расчетами для получения результирующих значений измеряемых величин и параметров катушек.

### Пояснения к работе

Виды измерений физических величин подразделяются на прямые, косвенные, совокупные, совместные.

Измерение, при котором числовое значение физической величины находят при помощи приборов, называется прямым измерением. Например, измерение напряжения вольтметром. Измерение, при котором искомое значение физической величины вычисляют по формуле, называется косвенным измерением. Например, определение мощности рассеяния резистора по измеренным значениям тока и напряжения и закону Ома или определение параметров катушки индуктивности  $Z_K$ ,  $R_K$ ,  $X_{LK}$  и  $L_K$  по измеренным значениям тока  $I$ , напряжения  $U$  и активной мощности  $P$ .

При этом параметры катушки индуктивности определяются

$$Z_K = U / I; \quad R_K = P_K / I^2; \quad X_{LK} = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \quad L_K = X_{LK} / \omega,$$

где  $\omega = 2\pi f$ , а  $f = 50$  Гц.

Из-за влияния многочисленных и принципиально неустранимых факторов, обуславливающих случайные погрешности, результат каждого измерения  $A_i$  будет отличаться от истинного значения  $X$  измеряемой величины:  $A_i - X = \Delta X_i$ .

Эту разность называют случайной погрешностью отдельного измерения.

Истинное значение  $X$  нам неизвестно. Однако, проведя большое количество измерений исследуемой величины  $X$ , можно считать за достоверное значение  $X_d$  среднеарифметическое значение  $X$ , вычисленное на основании ряда измерений  $A_i$  :

$$\bar{X} = (A_1 + A_2 + \dots + A_n) / n = \left( \sum_{i=1}^n A_i \right) / n,$$

где  $n$  – число измерений.

Тогда действительное значение активной мощности, определяемой в работе, будет равно

$$P_{\text{д}} = \bar{P} = \left( \sum_{i=1}^n P_i \right) / n.$$

### Схема электрической цепи

В работе используется электрическая схема, приведенная на рисунке 11.1.

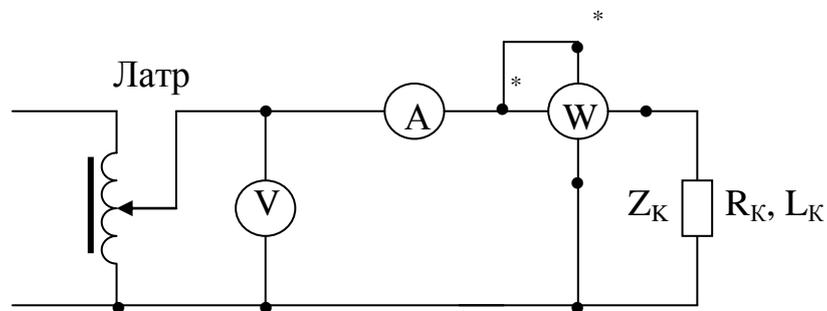


Рис. 11.1

Обозначения на рисунке: А – амперметр, V – вольтметр, W – ваттметр,  $Z_K$  – катушка индуктивности.

### Программа работы

1. Ознакомиться с заданной электрической схемой (рис.11.1) и выбрать соответствующие измерительные средства и приборы.
2. Ознакомиться с принципом работы выбранных измерительных средств и их техническими характеристиками.
3. Определить постоянные выбранных приборов.
4. Собрать электрическую схему (рис. 11.1) и после проверки преподавателем правильности подключения в схеме произвести необходимые измерения.
5. Измерения произвести 5 раз и полученные результаты записать в таблицу 11.1
6. По результатам эксперимента определить параметры катушек  $Z_K$ ,  $R_K$ ,  $X_{LK}$ ,  $L_K$ , а также действительное значение измеряемой мощности  $P_{\text{д}} = P_{\text{ср}} = P$

Таблица 11.1

№	Результат эксперимента			Результат расчета				
	U	I	P	Z <sub>к</sub>	R <sub>к</sub>	X <sub>ЛК</sub>	L <sub>к</sub>	P <sub>ср</sub> =P <sub>д</sub>
	B	A	Bт	Ом	Ом	Ом	Гн	Вт
1								
2								
3								
4								
5								

### Методические указания

При подсоединении ваттметров необходимо обратить внимание на правильность включения генераторных зажимов, отмеченных знаком \*.

### Вопросы

1. Что понимают под косвенными измерениями?
2. Какими методами измеряется полное, активное и реактивное сопротивления катушек индуктивностей?
3. Какие источники влияют на появление погрешностей измерения сопротивлений и индуктивностей?
4. Как определяются действительные значения сопротивлений и индуктивностей?

### Литература

1. Л. 8, § 2.3.
2. Л. 9, § 2.5.
3. Л. 10, § 1.5.

## Лабораторная работа № 12

### Исследование преобразователя линейных перемещений

**Цель работы.** Ознакомление с устройством и принципом действия преобразователя линейных перемещений (ПЛП) и исследование его статической характеристики.

## Пояснения к работе

На практике известно большое количество различных конструкций преобразователей линейных перемещений (ПЛП), выполненных на базе преобразователей с распределенными электромагнитными параметрами, отличающиеся высокой надежностью, чувствительностью и технологичностью конструкций. Основными требованиями, предъявляемыми к ним, являются: линейность статической характеристики, высокая чувствительность, надежность, широкий диапазон контролируемых перемещений и др. Подвижной частью преобразователей перемещений может быть обмотка, сердечник, постоянный магнит, экран или их определенное сочетание. Наибольшую надежность имеют конструкции преобразователей с подвижным сердечником, постоянным магнитом и экраном. Преобразователи с подвижным экраном отличаются простотой и технологичностью конструкций.

На рис. 12.1 показан преобразователь линейных перемещений с подвижным экраном [11]. Преобразователь состоит из П – образного магнитопровода 1, обмотки возбуждения 2, подключенной к источнику переменного тока, измерительной обмотки 3 и экрана 4 в виде короткозамкнутого витка, охватывающего один из стержней магнитопровода.

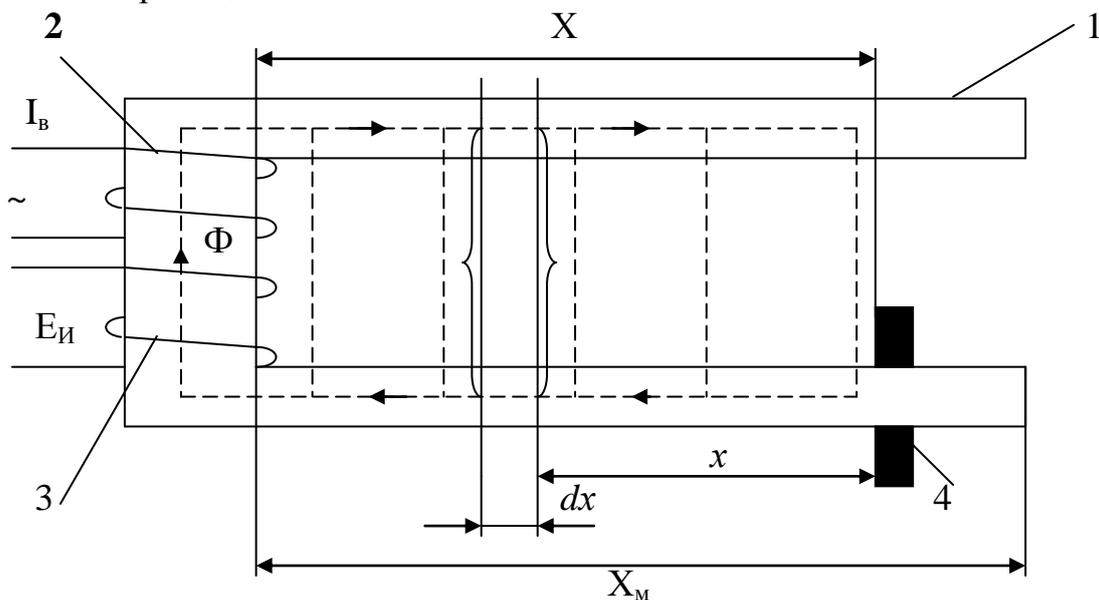


Рис. 12.1

Часть потока, созданного переменным током, протекающим по обмотке возбуждения, индуцирует в экране э. д. с. Ток в экране, вызванный этой э. д. с., создает поток, направленный встречно рабочему потоку  $\Phi$ . В результате поток в стержне в области экрана и за экраном уменьшается до величины, которой при малых значениях активного сопротивления экрана, можно пренебречь. Получим статическую характеристику преобразователя, имеющую важное значение для определения чувствительности, степени

нелинейности, погрешности и других характеристик, а также для определения оптимальных соотношений размеров магнитопровода и для расчета преобразователя.

Статическая характеристика преобразователя линейных перемещений и представляет функциональную зависимость выходной величины преобразователя от входной при их установившихся значениях и определяется из выражения

$$\dot{E}_n = -j\omega w_n \dot{\Phi}_{x-X},$$

где  $\omega$  – круговая частота;

$w_n$  – число витков измерительной обмотки;

$\Phi_{x=X}$  – магнитный поток, созданный током обмотки возбуждения при координате экрана  $X$ ;

$E_n$  – э. д. с. наводимая в измерительной обмотке потоком  $\Phi_{x-X}$ , в виде

$$\dot{E}_n = -j\omega w_n w_B g_m (I_B / (g_m Z_{m0} + \gamma \operatorname{th} \gamma X)),$$

где  $w_B$  – число витков обмотки возбуждения;

$I_B$  – ток в обмотке возбуждения;

$\gamma$  – величина, определяемая значениями погонного магнитного сопротивления  $r_m$  и погонной магнитной проводимости  $g_m$  в виде

$$\gamma = \sqrt{2g_m r_m};$$

$Z_{m0}$  – магнитное сопротивление основания магнитопровода.

### Схема электрической цепи

Для снятия статической характеристики ПЛП необходимо собрать электрическую схему, приведенную на рис. 12.2.

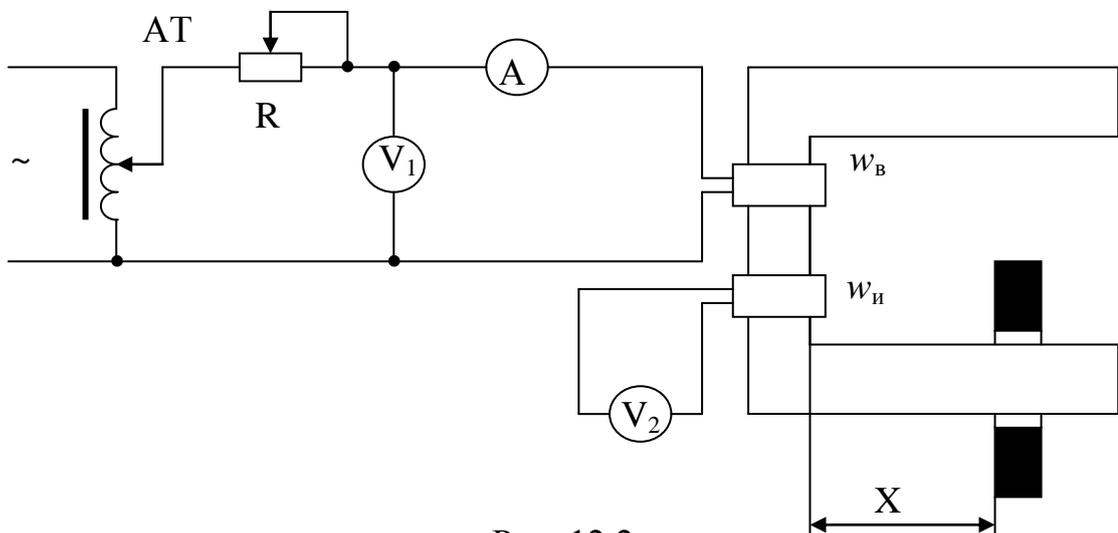


Рис. 12.2

В ней А – амперметр,  $V_1$  – вольтметр,  $V_2$  – электронный вольтметр, R – реостат, АТ – автотрансформатор, X – текущее значение подвижной части преобразователя,  $X_m$  – максимальное перемещение подвижной части ПЛП.

### Программа работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы преобразователя линейных перемещений.
2. Записать данные преобразователя, приборов и устройств.
3. Собрать схему для исследования ПЛП.
4. После проверки схемы преподавателем включить схему под напряжение (величина напряжения указывается преподавателем) и, перемещая подвижную часть ПЛП, снять зависимость  $E_{и} = f(x)$  в прямом и обратном направлениях перемещения подвижной части ПЛП, занеся данные в таблицу 12.1.
5. Построить график зависимости  $E_{и} = f(x)$ .

Таблица 12.1

X	см							
$E_{и}$	В							

### Методические указания

Рассмотренный ПЛП является трансформаторным преобразователем перемещения лишь при питании его от источника со стабильным током. Поэтому в схему необходимо включить сопротивление R.

### Вопросы

1. Понятие статической характеристики преобразователя линейных перемещений.
2. Какие основные требования предъявляются к преобразователям линейных перемещений?
3. Какие преобразователи линейных перемещений имеют наибольшую надежность?

### Литература

1. Л. 11, § 2-1.

## Лабораторная работа № 13

### Исследование феррозонда

**Цель работы.** Ознакомление с конструкцией и принципом действия феррозонда и исследование его статической характеристики.

#### Пояснения к работе

Феррозонд осуществляет преобразование постоянного магнитного поля за счет модуляции магнитного сопротивления стали в переменный магнитный поток, а последнего – в переменную э. д. с.

Феррозонд представляет собой плоский магнитопровод 1 (рис. 13.1), состоящий из одной или нескольких пластин из ферромагнитного материала с двумя отверстиями, через которые намотана модуляционная обмотка 2. Поверх модуляционной обмотки и перпендикулярно к ней намотана измерительная обмотка 3.

Стабильный переменный ток, протекающий в модуляционной обмотке, создает в объеме магнитопровода одинаковые магнитные поля, направленные в пространстве измерительной обмотки согласно. В этом случае на выходе измерительной обмотки сигнал отсутствует. В противном случае балансировать феррозонд можно путем перемещения измерительной обмотки вдоль продольной оси феррозонда и закрепления ее в точке, где э. д. с. в измерительной обмотке станет равной нулю.

За счет модуляционных ампервитков магнитопровод находится в насыщенном состоянии в течении каждого полупериода питающего напряжения. При этом проницаемость магнитопровода для продольного поля, созданного преобразуемым постоянным полем  $H_0$ , резко уменьшается. В момент, когда ток модуляции проходит через нулевое значение, проницаемость возрастает до начального значения. Таким образом, при стабильности ампервитков модуляции в измерительной обмотке будет индуцироваться э. д. с. удвоенной частоты, пропорциональная преобразуемому полю:

$$e = - w_{и} (d\Phi / d t) = - w_{и} B_{в} S (d\mu^* / d t),$$

где  $w_{и}$  – число витков измерительной обмотки;

$\Phi$  – рабочий магнитный поток;

$S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода;

$\mu^*$  – нормальная относительная магнитная проницаемость магнитопровода, равная

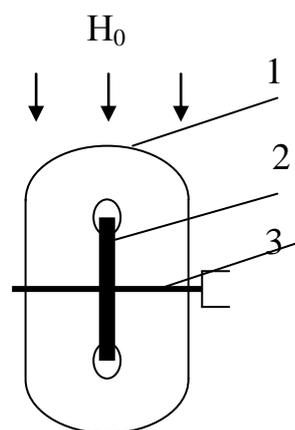


Рис. 13.1

$$\mu^* = B / \mu_0 H_0.$$

### Схема электрической цепи

Для исследования феррозонда в работе используется специальное устройство со встроенным феррозондом, показанное на рис. 13.2.

Устройство включает в себя замкнутый шихтованный магнитопровод 1 со сквозными отверстиями, через которые намотана модуляционная обмотка 2. Поверх модуляционной обмотки равномерно расположена измерительная обмотка 3. К выходу измерительной обмотки подключен электронный вольтметр V. Модуляционная обмотка питается от сети переменного тока через автотрансформатор АТ. Величина тока устанавливается с помощью автотрансформатора, реостата R и амперметра A<sub>2</sub>. На замкнутом магнитопроводе расположена также обмотка 4, питаемая от источника постоянного тока через амперметр A<sub>1</sub>. Выключатели K<sub>1</sub> и K<sub>2</sub> служат для отключения питающих токов в соответствующих цепях.

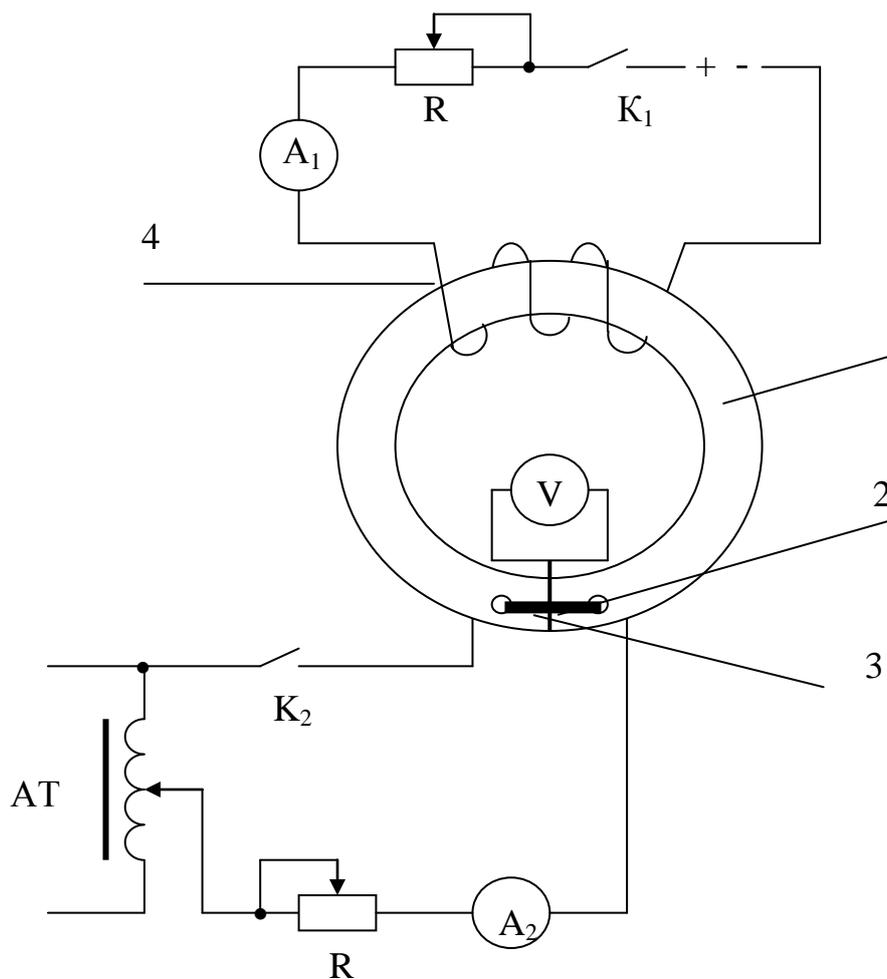


Рис. 13.2

## Программа работы

1. Собрать схему для исследования феррозонда.
2. Снять характеристику  $E_{и}$  ( $I_{\sim}$ ) при  $I_{\sim} = \text{const.}$  (табл. 13.1).
3. Снять при помощи осциллографа кривую э. д. с. на выходе феррозонда.

Таблица 13.1

I	A										
E	мВ										

## Вопросы

1. Как располагается модуляционная обмотка на феррозонде?
2. Почему при наличии тока в обмотке модуляции и отсутствии постоянного тока в обмотке сигнал на выходе модуляционной обмотки отсутствует?
3. Как происходит преобразование постоянного тока в переменную э. д. с. в феррозонде?

## Литература

1. Л. 12, § 1.2.
2. Л. 13, § 2.1.
3. Л. 14, § 3.5.

## Лабораторная работа № 14

### Исследование биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

**Цель работы.** Снятие входной и выходной характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и определение по статическим характеристикам его параметров.

## Пояснения к работе

Возможны три схемы включения биполярных транзисторов: с общей базой ОБ, с общим эмиттером ОЭ и с общим коллектором ОК. Название схемы показывает, какой электрод транзистора является общим для входной

и выходной цепей. Схемы включения транзисторов отличаются своими свойствами, но принцип усиления колебаний остается одинаковым.

В схеме с общим эмиттером ОЭ источник входного напряжения включен в цепь эмиттер – база, а сопротивление нагрузки  $R_n$  и источник питания – в цепь эмиттер – коллектор, так что эмиттер является общим электродом для входной или выходной цепей. Входное сопротивление схемы с ОЭ больше, чем у схемы с ОБ, так как входным током в ней является ток базы, который на много меньше тока эмиттера и тока коллектора. Это сопротивление составляет сотни омов. Входное сопротивление схемы с ОЭ велико и может составлять до ста килоомов. Коэффициент усиления по напряжению схемы с ОК  $K_u = 0,9 \div 0,95$ , т.е. близок к единице; эту схему часто называют эмиттерным повторителем. Схема с ОК используется для согласования отдельных каскадов усиления, источника сигнала или нагрузки с усилителем.

Характеристиками транзистора называются зависимости между токами и напряжениями во входной и выходной цепях.

Так, для схемы с общим эмиттером ОЭ входной цепью является цепь базы и входная характеристика представляет собой зависимость тока базы от напряжения эмиттер – база при постоянном напряжении между эмиттером и коллектором, т.е.  $I_b = f(U_{э-б})$  при  $U_{э-к} = \text{const}$ . Выходной цепью для этой схемы является цепь коллектора и выходной характеристикой будет зависимость тока коллектора от напряжения эмиттер – коллектор при неизменном токе базы, т.е.  $I_k = f(U_{э-к})$  при  $I_b = \text{const}$ .

### Схема электрической цепи

На рис. 14.1 показана электрическая схема для снятия входной и выходной характеристик биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

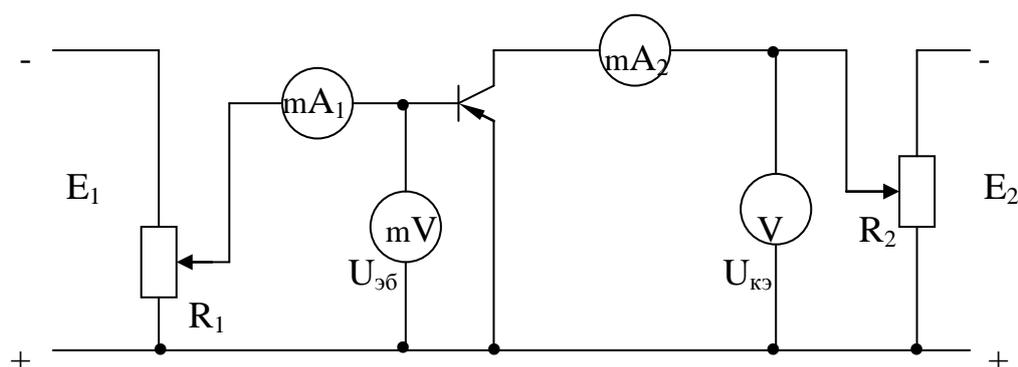


Рис. 14.1

### Программа работы

1. Сборка и опробование схемы.
2. Снятие входных статических характеристик транзистора  $I_b = f(U_{э-б})$  при  $U_{э-к} = \text{const}$  и заполнение таблицы 14.1.

3. Снятие выходных статических характеристик транзистора  $I_k = f(U_{э-к})$  при  $I_б = \text{const}$  и заполнение таблицы 14.2.

4. Построение графиков статических характеристик транзистора.

Таблица 14.1

№ п/п	$U_{эк1}$		$U_{эк2}$		$U_{эк3}$	
	$U_{бэ}(мВ)$	$I_б(мкА)$	$U_{бэ}(мВ)$	$I_б(мкА)$	$U_{бэ}(мВ)$	$I_б(мкА)$
1						
2						
3						
4						

Таблица 14.2

№ п/п	$I_{б1}$		$I_{б2}$		$I_{б3}$	
	$U_{эк}(В)$	$I_к(мА)$	$U_{эк}(В)$	$I_к(мА)$	$U_{эк}(В)$	$I_к(мА)$
1						
2						
3						
4						

### Методические указания

При работе биполярного транзистора в качестве усилителя электрических колебаний входное переменное напряжение  $U_{вх}$  (сигнал, подлежащий усилению) подают последовательно с источником постоянного напряжения смещения  $U_{см}$  между эмиттером и базой, а выходное напряжение  $U_{вых}$  (усиленный сигнал) снимается с нагрузочного резистора  $R_n$ .

## Вопросы

1. Какой транзистор называют биполярным?
2. Что такое p –n переход?
3. Виды включения биполярных транзисторов в усилителях?
4. Что называют характеристиками биполярного транзистора?
5. Сколько p –n переходов имеет биполярный транзистор?

## Литература

1. Л. 15, § 1.3.
2. Л. 16, § 1.4.

## Лабораторная работа № 15

### Исследование маломощных выпрямителей

**Цель работы.** Исследование внешних характеристик маломощных одно- и двухполупериодных полупроводниковых выпрямителей с фильтрами и без них.

#### Пояснение к работе

Для преобразования переменного тока в постоянный используются одно- и двухполупериодные выпрямители. В схеме однополупериодного выпрямителя (рис. 15.1,а) через нагрузки  $R_n$  проходит только положительная полуволна тока  $I_n$  (рис. 15.1,б,в), что определяется включением диода в соответствующей полярности.

Более широкое распространение получила двухполупериодная мостовая схема выпрямителя (рис. 15.2,а). В этой схеме выпрямителя ток проходит через нагрузку в обе половины периода (рис. 15.2,б).

Переменный ток характеризуется средним, амплитудным, действующим и средневывпрямленным значениями.

Среднее значение тока за период называется постоянной составляющей:

$$I_0 = (1 / T) \int_0^T i(t) dt.$$

Амплитудное (пиковое) значение  $I_m$  – наибольшее мгновенное значение тока за период. При несимметричных сигналах различают положительное и отрицательное пиковые значения.

Среднеквадратическое значение сигнала:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Средневыпрямленное значение:

$$I_{\text{св}} = (1 / T) \int_0^T |i(t)| dt,$$

это среднее значение модуля тока после двухполупериодного выпрямления.

Амплитудное, средневыпрямленное и среднеквадратическое значения тока связаны между собой коэффициентами формы и амплитуды.

Коэффициентом амплитуды называют отношение  $k_a = I_m / I$ , коэффициент формы кривой напряжения  $k_{\phi} = I / I_{\text{ср}}$ .

Средневыпрямленное значение синусоидального тока:

$$I_{\text{св}} = (1 / T) \int_0^T |i(t)| dt = (2 / \omega T) \int_0^{T/2} |I_m \sin \omega t| d\omega t = 2I_m / \pi \approx 0,637 I_m.$$

Коэффициент формы при двухполупериодном выпрямлении  $k_{\phi 2} = I / I_{\text{ср}} = 0,707 I_m / 0,637 I_m = 1,11$ .

При однополупериодном выпрямлении среднее значение выпрямленного тока вдвое меньше, поэтому коэффициент формы вдвое больше:

$$k_{\phi 1} = 2I / I_{\text{ср}} = 2,22.$$

Коэффициент амплитуды синусоидального тока

$$k_a = I_m / I = I_m / 0,707 I_m = 1,41.$$

### Схемы электрической цепи

Для исследования однополупериодного выпрямителя используется схема, показанная на рис. 15.1. Она включает автотрансформатор АТ, полупроводниковый диод Д, амперметр, вольтметр, нагрузочное сопротивление  $R_n$ .

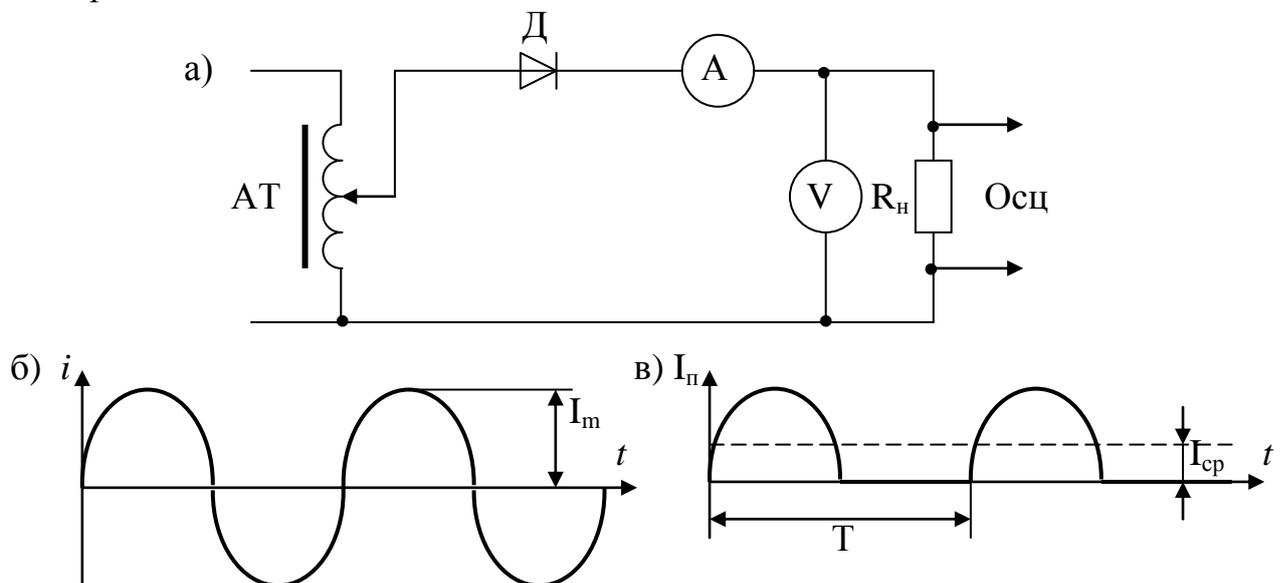


Рис. 15.1

На рис. 15.2 показана электрическая схема для экспериментального исследования выпрямителя. Выпрямитель состоит из четырех диодов, соединенных по мостовой схеме. На одну диагональ моста подается напряжение от автотрансформатора АТ, а с другой диагонали снимается напряжение и подается в нагрузку  $R_H$ . В качестве фильтра используется в одном случае конденсатор С, а в другом – цепочка из резистора R и емкости С.

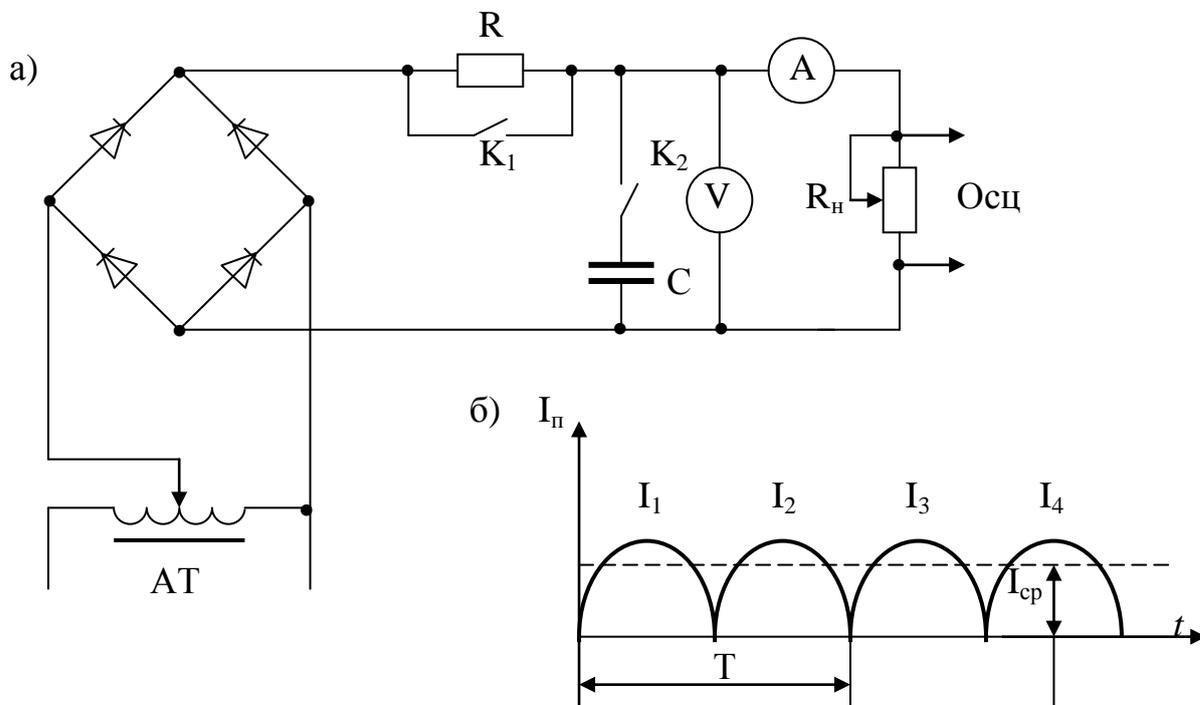


Рис. 15.2

### Программа работы

1. Снять и построить внешнюю характеристику однополупериодного выпрямителя  $U_{01} = f(I_{01})$ , заполнив таблицу 15.1.

Таблица 15.1

$I_{01}$	А					
$U_{01}$	В					

2. Снять осциллограмму тока в  $R_H$ .
3. Снять и построить внешнюю характеристику  $U_{02} = f(I_{02})$  мостового двухполупериодного выпрямителя, заполнив таблицу 15.2.
4. Снять осциллограмму тока в  $R_H$  в случае (рис. 15.2,а):
  - а) без фильтров (включатель  $K_1$  замкнут, а включатель  $K_2$  разомкнут);
  - б) с фильтром С (включатели  $K_1$  и  $K_2$  замкнуты);
  - в) с фильтром RC (включатель  $K_1$  разомкнут, а включатель  $K_2$  замкнут).

$I_{02}$	А					
$U_{02}$	В					

5. Зарисовать кривые тока

### Методические указания

Маломощные мостовые двухполупериодные выпрямители могут быть собраны и на двух диодах и двух резисторах (рис. 15.3).

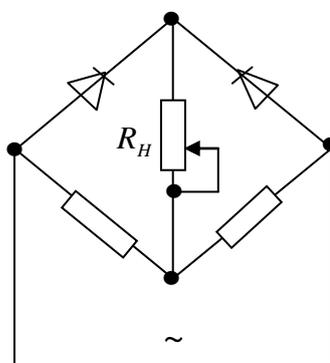


Рис. 15.3

### Вопросы

1. Что понимают под амплитудным, средним, действующим и среднев्यпрямленным значениями токов?
2. Что понимают под коэффициентом амплитуды и коэффициентом формы?
3. Зарисовать схему однополупериодного и двухполупериодного мостового выпрямителей.
4. Достоинства и недостатки однополупериодного и двухполупериодного мостового выпрямителей.

### Литература

1. Л. § 5.1 – 5.4
2. Л. § 4.6.

## Лабораторная работа № 16

### Исследование однофазного малоомощного трансформатора

**Цель работы.** Ознакомление с конструктивным устройством трансформатора низкого напряжения небольшой мощности и методом испытания и экспериментальное получение рабочих характеристик трансформатора.

#### Пояснение к работе

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе. Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется первичной; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, - вторичной.

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если первичное напряжение меньше вторичного, то трансформатор называется повышающим, если же первичное напряжение больше вторичного, то – понижающим. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

Действия трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет протекать переменный ток, который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки трансформатора, индуцирует в ней э. д. с. Под действием этой э. д. с. по вторичной обмотке и через приемник энергии будет протекать ток. Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной цепи во вторичную, но при другом напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную цепь.

#### Схема электрической цепи

В работе используется понижающий трансформатор. Электрическая схема для испытания трансформатора приведена на рис. 16.1. Она содержит амперметр  $A_1$ , вольтметр  $V_1$  и ваттметр  $W$ , включенные в первичную цепь трансформатора, и амперметр  $A_2$ , вольтметр  $V_2$  и нагрузку в виде резистора  $R_n$ , включенные в его вторичную цепь. Схема питается от трансформатора АТ.

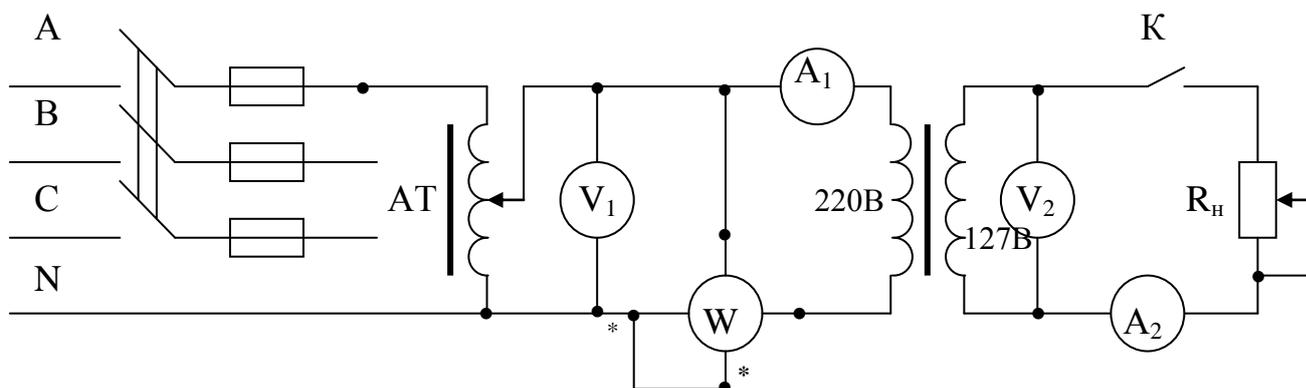


Рис. 16.1

### Программа работы

1. Перед началом работы ознакомиться с заводскими данными трансформатора и проверить соответствие измерительной аппаратуры и трансформатора напряжения.
2. Записать данные измерительных приборов: название, тип, систему, пределы измерения, цену деления шкалы и заводской номер.
3. Записать заводские данные испытуемого трансформатора и трансформатора напряжения.
4. Ознакомиться с примечанием к работе.
5. Собрать схему (рис. 16.1) и провести испытание трансформатора Т, проведя три опыта: холостого хода, короткого замыкания и с нагрузкой.

### Опыт холостого хода

1. Разомкнуть цепь нагрузки ключом К. Установить напряжение  $U_{1н}$  и замерить ток  $I_{10}$  и мощность  $P_{10}$  при разомкнутом вольтметре  $V_2$ .
2. Включить вольтметр  $V_2$  и замерить напряжение  $U_2$ .
3. Данные опыта записать в таблицу 16.1 и произвести соответствующие вычисления.

Таблица 16.1

Опыт				Расчет	
$U_{1н}$	$U_{20}$	$I_{10}$	$P_{10}$	$K_{12}$	$\cos\phi$
В	В	А	Вт	$U_1 / U_2$	

### Опыт короткого замыкания

1. Полностью вывести автотрансформатор АТ, установив нагрузку на “0”.

2. Во вторичную обмотку трансформатора включить только амперметр  $A_2$ .
3. Подав напряжение на автотрансформатор АТ, медленно его увеличить до достижения  $I_{1к} = I_{1н}$  (смотреть приложение).
4. Данные опыта внести в таблицу 16.2 и произвести соответствующие вычисления.

Таблица 16.2

Опыт				Расчет				
$U_{1к}$	$I_{1к}$	$P_{1к}$	$I_{2к}$	$R_k$	$R_n$	$X_k$	$Z_k$	$U_k \%$
В	А	Вт	А	Ом	Ом	Ом	Ом	%

### Опыт с нагрузкой

1. Привести схему в первоначальное состояние.
2. Реостат  $R_n$  установить на максимальное значение.
3. Включить трансформатор под напряжение  $U_2 = U_{2н}$ , равное номинальному (см. примечание).
4. Замкнув вторичную цепь с нагрузкой  $R_n$  ключом К и устанавливая с помощью реостата  $R_n$  различный вторичный ток в трансформаторе вплоть до номинального значения  $I_{2н}$ , снять характеристику  $U_2 = f(I_2)$  (см. примечание).
5. Данные опыта внести в таблицу 16.3, произвести соответствующие вычисления и начертить график  $U_2 = f(I_2)$

Таблица 16.3

№	Опыт					Расчет		
	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$U_2$	$I_2$	$\cos\varphi$	$P_2$	$\eta$
	В	А	Вт	В	А		Вт	%
1								
2								
3								
4								
5								

*Примечание:*  $I_2 = 0$ ;  $I_2 = (1/4) I_{2н}$ ;  $I_2 = (1/2) I_{2н}$ ;  $I_2 = (3/4) I_{2н}$ ;  $I_2 = I_{2н}$ .

## Методические указания

Перед началом проведения опыта короткого замыкания вторичной обмотки исследуемого трансформатора обратить особое внимание на установку в нулевое положение автотрансформатора АТ и на отсутствие напряжения на его входе.

### Вопросы

1. Какая разница между автотрансформатором и трансформатором?
2. Какая разница между опытом короткого замыкания и аварийным режимом короткого замыкания трансформатора?
3. Начертить схему при испытании однофазного трансформатора для проведения опыта: короткого замыкания, холостого хода и с нагрузкой.
4. Что понимают под коэффициентом трансформации?
5. Что понимают под понижающим и повышающим трансформаторами?

### Литература

1. Л. 1, § 10.1, 10.11.

## Лабораторная работа № 17

### Исследование генератора постоянного тока с параллельным возбуждением

**Цель работы.** Ознакомление со структурой и принципом работы генератора постоянного тока с параллельным возбуждением, снятие и исследование основных его характеристик.

#### Пояснение к работе

Генератор постоянного тока преобразует механическую энергию в электрическую. Он состоит из трех основных частей: первая – электромагнит постоянного тока; вторая – якорь, создающий переменную э. д. с. под действием механической энергии; третья – щеточный коллектор, преобразующий переменную э. д. с. в постоянную. Обмотка возбуждения генератора ( $w_B$ ) параллельно подключена к якорю (рис. 17.1).

При вращении якоря генератора за счет остаточного магнетизма в сердечнике  $\Phi_{ост}$  наводится небольшая э. д. с  $E_{ост}$  в якоря. Переменная э. д. с. с помощью коллекторных пластин механическим путем преобразуется в постоянную э. д. с., равную

$$E_{ост} = c n \Phi_{ост}.$$

Ток  $I_{\text{ост}}$ , появляющийся в электромагнитной обмотке под действием этой э. д. с., создает магнитный поток  $\Phi_{\text{ост}}$ . Если направление этого потока совпадает с потоком магнитного остатка, то в ферромагнитном сердечнике машины увеличивается магнитный поток и генератор “просыпается”. А если они противоположны, то машина “не просыпается”. Для этого необходимо поменять местами соединяющиеся части электромагнитной обмотки с якорем. Наведенная э. д. с. в обмотке якоря равна

$$E = c n \Phi.$$

Здесь  $c$  – конструктивная постоянная машины;

$n$  – скорость вращения якоря генератора, об/мин;

$\Phi$  – магнитный поток, пересекающий обмотку якоря.

Напряжение, появившееся на участке якоря, определяется

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}.$$

Здесь  $I_{\text{я}}$  – ток, проходящий через обмотку якоря;

$R_{\text{я}}$  – сопротивление цепи якоря.

Исходя из того, что скорость оборотов якоря генератора постоянна ( $n = \text{const}$ ), то регулирование величины э. д. с., наводимой в якоре, зависит только от магнитного потока  $\Phi$ . Оно выполняется с помощью реостата регулирования  $R_{\text{р}}$  в цепи возбуждения изменением силы тока возбуждения. И, действительно, существует зависимость между магнитным потоком и током возбуждения:

$$\Phi = I_{\text{в}} w_{\text{в}} / R_{\text{м}},$$

Здесь  $\Phi$  – магнитный поток, возникающий от тока, проходящего в обмотке возбуждения в одном полюсе;

$I_{\text{в}}$  – ток, проходящий в обмотке возбуждения;

$w_{\text{в}}$  – число витков в обмотке возбуждения;

$R_{\text{м}}$  – магнитное сопротивление магнитопровода.

Перед включением реостат регулирования устанавливают на максимальное сопротивление. Затем сопротивление реостата регулирования снижают до того момента, пока не появится напряжение холостого хода  $U_0$ , которое в некоторых частях генератора ненамного превышает номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ .

При работе генератора в режиме холостого хода ток нагрузки  $I_{\text{н}}$  равен нулю, а напряжение в якоре берется равным  $E$ .

Работу электрических машин определяют по их характеристикам. Эти характеристики состоят из кривых, которые выражают переменные только двух параметров, касающихся машин, а остальные остаются неизменными. Число оборотов якоря для генератора практически считается постоянным

(все турбины оснащены регуляторами скорости), а переменными величинами считаются напряжение на зажимах якоря, ток якоря и ток возбуждения.

В исследовании генератора постоянного тока с параллельным возбуждением берутся три основные характеристики:

1. *Характеристика холостого хода* – зависимость между током возбуждения  $I_B$  и напряжением  $U$  на частях генератора при постоянной скорости вращения генератора, т. е.  $U_0 \approx E = f(I_B)$  при  $n = \text{const}$  и  $I = 0$ .

Обычно падением напряжения, возникшим из-за тока возбуждения в обмотках якоря, пренебрегают. Потому, что поток возбуждения составляет о малую часть номинального тока

$$I_B = (0,02 - 0,05) I_{\text{ном.}}$$

Характеристика холостого хода снимается в режиме возбуждения самого генератора. Эта характеристика помогает определить магнитные свойства машины.

2. *Внешняя характеристика* – зависимость между током нагрузки и напряжением в частях генератора при постоянстве скорости вращения якоря и величины сопротивления реостат регулирования в цепи возбуждения, т. е.

$$U = f(I) \text{ при } n = \text{const} \text{ и } R_p = \text{const}$$

Ток потребителя  $I = U / R_n$ ,  $I_a = I + I_B$ .

Внешняя характеристика помогает определить электрические свойства нерегулируемого генератора.

Появление тока нагрузки понижает напряжение на частях якоря.

Напряжение на частях якоря в режиме электрического равновесия генератора определяется

$$U = E - I_a \cdot R_a \approx E - I \cdot R_a.$$

С повышением тока потребителя  $I$  увеличивается и падение внутреннего напряжения на обмотках якоря и является причиной падения напряжения на частях генератора. В результате магнитный поток  $\Phi$  и э. д. с.  $E$  понижаются, создавая напряжение.

Значение  $\Delta U \% = (U_0 - U_n) / U_n \cdot 100\%$  считается номинальным падением напряжения и бывает в пределах от 10 до 15%. Итак, внешняя характеристика показывает постоянство напряжения генератора при меняющейся нагрузке.

3. *Регулировочная характеристика* – зависимость между током потребителя и током возбуждения, когда скорость вращения якоря и напряжение на частях остаются неизменными, т. е.

$$I_B = f(I) \text{ при } n = \text{const} \text{ и } U_0 = \text{const.}$$

Для хорошей работы потребителей электрической энергии (электродвигатели, лампы и т. п.) напряжение, поступающее от источника, не должно меняться с изменением нагрузки и должно быть равным номинальному.

Регулировочная характеристика показывает насколько необходимо изменить ток возбуждения, чтобы нагрузка на частях генератора была постоянной.

### Схема электрической цепи

В работе используется стенд, включающий генератор постоянного тока с параллельным возбуждением, сочлененный с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, реостат регулирования  $R_p$ , измерительные приборы и потребитель в виде лампового реостата  $R_n$ .

На рис. 17.1 показана электрическая схема для снятия основных характеристик генератора постоянного тока, приводимого во вращение асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, питающимся от трехфазного источника переменного тока. Схема включает амперметр  $A_1$  для измерения тока возбуждения  $I_B$ , амперметр  $A_2$  для измерения тока  $I$  потребителя  $R_n$  и вольтметр для измерения напряжения на потребителе.

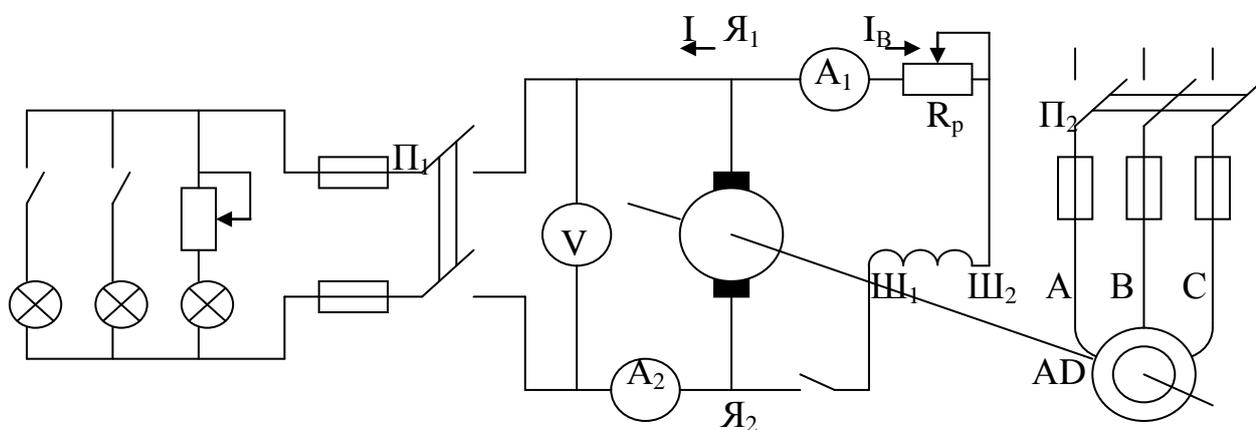


Рис. 17.1

### Программа работы

1. Ознакомления со стендом и со всеми измерительными приборами и их паспортными данными.
2. Сборка электрической схемы, показанной на рис. 17.1.
3. Подключение к источнику асинхронного двигателя и проверка работы генератора, подключив к цепи пусковой реостат с полным сопротивлением и проверив показания вольтметра. За счет остатка магнитного потока  $\Phi_0$  в

обмотке якоря индуктируется очень малое значение э. д. с.  $E_K$ . Если схема собрана правильно, то с плавным понижением сопротивления реостата регулирования  $R_p$  показания вольтметра должны повышаться, т. е. машина возбуждается.

Если показания вольтметра понижаются, то магнитный поток, создающий ток возбуждения, направлен противоположно остаточному магнитному потоку и машина не возбуждается. В таком случае необходимо остановить генератор и поменять направление тока возбуждения. Для этого достаточно поменять местами части обмоток возбуждения, подходящих к якорю.

4. Для получения характеристики холостого хода генератора необходимо от нуля плавно повышать ток возбуждения, повышать напряжение на участках генератора до  $(1,2 \dots 1,25) U^{\wedge}$ , а также выполнять размеры в прямом (растущем) и обратном (убывающем) направлении для ранее взятых 8...10 характерных точек, относящихся к значениям напряжения. Нулевое значение тока возбуждения берется при разомкнутом положении ключа  $K$  цепи возбуждения (рис. 17.1). Результаты измерений записываются в таблицу 17.1

5. Для получения внешней характеристики генератора, не нагружая генератор, необходимо сначала его возбудить до напряжения  $(1,05 \dots 1,2) U^{\wedge}$  в режиме холостого хода. Записать значения тока возбуждения в этот момент. Включив переключатель  $\Pi$ , изменять значение тока нагрузки от 0 до  $I = (1,1 \dots 1,2) I_{ном}$  и записать значения изменяющегося тока возбуждения и напряжения на участках генератора для 6...8 характерных точек.

Результаты измерений записать в таблицу 17.2. Измерить номинальное напряжение.

Таблица 17.1

$I_B, A$								
$U_{\rightarrow}, B$								
$U_{\leftarrow}, B$								

Таблица 17.2

$I, A$								
$U, B$								
$I_B, A$								

6. Для получения регулировочной характеристики необходимо потребитель (нагрузку) подключить к генератору и с помощью реостата регулирования  $R_p$  создать номинальное напряжение на зажимах генератора. Подключить переключатель  $\Pi_1$ , необходимо изменять ток нагрузки аналогично 5-му пункту. Изменением сопротивления реостата регулирования  $R_p$  в цепи возбуждения установить напряжение, равное напряжению на зажимах генератора. Полученные результаты записать в таблицу 17.3.

Таблица 17.3

I, А								
$I_B$ , А								

7. Погрешность увеличения тока возбуждения определить по формуле

$$\Delta I_B = (I_B - I_{B0}) / I_{B0}.$$

8. Построить все характеристики с учетом масштаба.

9. Делаются выводы относительно:

а) физических процессов, объясняющих свойственность каждой характеристики;

б) о причине изменения тока возбуждения при получении внешней характеристики.

### Методические указания

В генераторе с параллельным возбуждением при изменении нагрузки нужно поддерживать значение напряжения на заданном уровне. Для этого с помощью реостата регулирования  $R_p$  в цепи возбуждения необходимо изменять ток возбуждения  $I_B$ , магнитный поток  $\Phi$  и э. д. с.  $E$ , а напряжение оставить постоянным  $U = \text{const}$ .

### Вопросы

1. Расскажите об особенностях генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

2. Расскажите о методе получения тока возбуждения. В чем заключается особенность коллектора?

3. Чем отличается напряжение на зажимах генератора от э. д. с.?

4. Объясните принцип самовозбуждения генератора постоянного тока.

5. Какие характеристики характеризуют генератор постоянного тока?

6. Перечислите типы генератора постоянного тока. Нарисуйте их принципиальные схемы.

### **Литература**

1. Л. 1, § 14.1 - 14.8.
2. Л. 2, § 11.1, 11.2, 11.12.

## Л и т е р а т у р а

1. Электротехника: Учебник для неэлектротехнич. спец. вузов (Зайдель Х. Э., Кокен – Далин В. В., Крымов В. В. И др.; Под ред. В. Г. Герасимова. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Высшая школа, 1985.
2. Иванов И. И., Равдоник В. С.. Электротехника: Учеб. пособие для неэлектротехнич. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1984.
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А, Нетушил А. В., Страхов С. В.. Основы теории цепей. – М.: ГЭИ, 1963.
4. Бессонов Л. А.. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1984.
5. Попов В. П.. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1985.
6. Плахтиев А. М.. Переносные бесконтактные токоизмерители: Учебное пособие. – Ташкент, ТашПИ.1979.
7. Основы метрологии и электрические измерения. Под ред. Душина Е. М.. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Электрические измерения. Под. ред. Фремке А. В. и Душина Е. М.. – Л.: Энергия, 1980.
9. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. М.: Изд – во стандартов, 1985.
10. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие для вузов (Евтихийев Н. Н., Купершмидт Я. А. и др.; Под ред. Евтихеева Н. Н.. – М.: Энерготомиздат, 1990.
11. Плахтиев А. М.. Преобразователи электрических и неэлектрических величин с распределенными параметрами: Учебное пособие. – Ташкент, ТашПИ, 1978.
12. Плахтиев А. М.. Измерительные преобразователи с распределенными параметрами. – Ташкент: Фан, 1987.
13. Разин Г. И., Щелкин А. П.. Бесконтактное измерение электрических токов. – М.: Атомиздат, 1971.
14. Андреев Ю. А., Абрамзон Г. В.. Преобразователи тока для измерений без разрыва цепи. – ЛО, 1979.
15. Забродин Ю. С.. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М: Высшая школа, 1982.
16. Основы промышленной электроники. Под. ред. Герасимова В. Г. – М: Высшая школа, 1978.

## О г л а в л е н и е

I. Общие рекомендации по проведению лабораторного эксперимента	5
II. Рекомендации по электрическим измерениям в лабораторном практикуме . . . . .	11
III. Техника безопасности при работе с электрическими установками.	18
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Исследование линейной разветвленной цепи постоянного тока . . . . .	19
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Передача энергии постоянным током	22
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Простая цепь однофазного переменного тока . . . . .	25
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Исследование цепи, содержащей индуктивно связанные катушки . . . . .	26
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Исследование резонанса при последовательном соединении (резонанс напряжений) . . . . .	31
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Исследование резонанса при параллельном соединении (резонанс токов) . . . . .	35
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой . . . . .	38
<i>Лабораторная работа № 8.</i> Исследование цепи трехфазного тока, соединенной треугольником . . . . .	41
<i>Лабораторная работа № 9.</i> Определение магнитных проводимостей зазоров в электротехнических устройствах . . . . .	44
<i>Лабораторная работа № 10.</i> Изучение подключений измерительных приборов и определение их постоянных . . . . .	48
<i>Лабораторная работа № 11.</i> Проведение эксперимента по косвенным методам измерения электрических сопротивлений и индуктивности катушек. . . . .	51
<i>Лабораторная работа № 12.</i> Исследование преобразователя линейных перемещений. . . . .	53
<i>Лабораторная работа № 13.</i> Исследование феррозонда. . . . .	57
<i>Лабораторная работа № 14.</i> Исследование биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. . . . .	59
<i>Лабораторная работа № 15.</i> Исследование маломощных выпрямителей. . . . .	62
<i>Лабораторная работа № 16.</i> Исследование однофазного маломощного трансформатора. . . . .	66
<i>Лабораторная работа № 17.</i> Исследование генератора постоянного тока с параллельным возбуждением. . . . .	69
Литература . . . . .	76

Подписано в печать .03.2007г.  
Формат А5. Условных печатных листов 8.  
Тираж 100. Заказ №  
Отпечатано в типографии ТГАИ  
Ташкент,