

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

А. М. Плахтиев

**Руководство
к лабораторным работам
по теории электрических
цепей**

Ташкент – 2006

А.М. Плахтиев

Руководство к лабораторным работам по теории электрических цепей. Учебное пособие, Ташкент, 2006.

В учебном пособии приведены методические указания, общие рекомендации и программы подготовки и осуществления экспериментальных исследований линейных и нелинейных цепей и электротехнических устройств, изучаемых студентами электротехнических специальностей в курсе “Теория электрических цепей”. Оно также может быть полезным студентам, изучающим курс “Теоретические основы электротехники”.

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

Может быть полезным студентам магистратуры, аспирантам и научным сотрудникам, а также преподавателям, занимающимся разработкой учебных пособий к занятиям студентов электротехнических 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*

I. Общие рекомендации по проведению лабораторного эксперимента

ПРАВИЛА

выполнения работ в лаборатории кафедры теории электрических цепей

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, произошедшее 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 “Ноль”, 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 "Теория электрических цепей"

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 $100 \cdot 100$ 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 Δ – 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 γ – 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 δ – 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.

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

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

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

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 δ_U и тока δ_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:

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

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

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:

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} R &= (22,2 \pm 0,9) \text{ Ом,} \\ X &= \sqrt{(U / I)^2 - (P / I^2)} \pm \delta_X = \sqrt{33,2^2 - 22,2^2} \pm 6,34\% = \sqrt{610} \pm 6,34\% = \\ &= 24,8 \pm 24,8 \cdot 6,34 / 100 = (24,8 \pm 1,5), \\ X &= (24,8 \pm 1,5) \text{ Ом.} \end{aligned}$$

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 Омах 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:

$$\delta_I = -1/(1 + R_{BXA}/R_A).$$

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_{BXV}); эта погрешность равна:

$$\delta_V = -1/(1 + R_{BXV}/R_V).$$

Погрешности метода δ_I и δ_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 “Ноль”.

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.

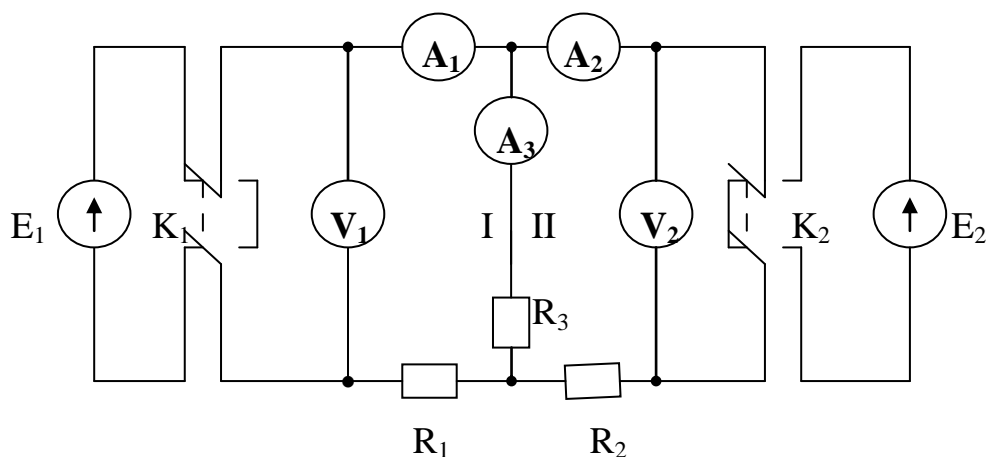


Рис. 1.1.

В качестве источников питания E_1 и E_2 используются либо аккумуляторные батареи, либо выпрямители с постоянным напряжением на выходе $6 \div 8$ В. При помощи переключателей K_1 и K_2 источники э. д. с. E_1 и E_2 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	
	0			Экспериментальные данные
0				
	0			Расчетные данные
0				

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. 3, § 1-6, 1-9, 1-10.
2. Л. 4, § 1.7, 1.14, 1.16.
3. Л. 5, § 1.4

Лабораторная работа № 2

Исследование активного двухполюсника

Цель работы. Экспериментальная проверка возможности замены активного двухполюсника эквивалентным генератором.

Пояснение к работе

При расчете линейных электрических цепей нередко бывает необходимо определить ток в какой-нибудь одной ветви. В этом случае по отношению к зажимам этой ветви всю остальную часть можно рассматривать как активный двухполюсник и при расчете заменить его эквивалентным генератором с некоторой эквивалентной э. д. с. E_r и некоторым внутренним эквивалентным сопротивлением R_r . Э. д. с. эквивалентного генератора равна напряжению между точками присоединения нагрузки при ее отключении. Сопротивление эквивалентного генератора равно сопротивлению между точками присоединения нагрузки при ее отключении и равенстве нулю э. д. с. источников.

При известных параметрах цепи параметры эквивалентного генератора могут быть определены аналитически. Если же параметры цепи неизвестны, то параметры генератора можно определить экспериментально по величинам тока и напряжения нагрузки при двух значениях сопротивлений приемника (метод двух нагрузок), а также из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Основные соотношения

Параметры генератора по методу двух нагрузок определяются

$$E_r = (U_2 I_1 - U_1 I_2) / (I_1 - I_2), R_r = (U_2 - U_1) / (I_1 - I_2),$$

где U_1 и U_2 – показания вольтметра при первой и второй нагрузках, I_1 и I_2 – показания амперметра при тех же нагрузках.

Параметры генератора по методу холостого хода и короткого замыкания определяются

$$E_r = U_{xx}; R_r = U_{xx} / I_{кз},$$

где U_{xx} – показание вольтметра в режиме холостого хода,

$I_{кз}$ – показание амперметра в режиме короткого замыкания ($R_H = 0$).

Для определения тока нагрузки применяется либо формула Тевенена-Гельмгольца

$$I = E_r / (R_r + R_H),$$

либо формула Поливанова

$$I = I_{кз} / (1 + R_H / R_r),$$

где $R_H = U_{12} / I$ – сопротивление нагрузки, R_r – сопротивление генератора.

Мощность нагрузки определяется по формуле $P_H = I^2 R_H$, причем значение этой мощности зависит от соотношения R_r и R_H .

Внешняя характеристика $U_{12} = f(I)$ эквивалентного генератора дает возможность просто определять ток нагрузки при заданном значении ее сопротивления. Для этого достаточно найти точку пересечения внешней характеристики и вольт-амперной характеристики заданного сопротивления.

Схема электрической цепи

Схема приведена на рис. 2. 1. Часть цепи, обведенная пунктиром, содержит элементы с неизвестными параметрами и подлежит замене эквивалентным генератором с э. д. с. E_r и внутренним сопротивлением R_r .

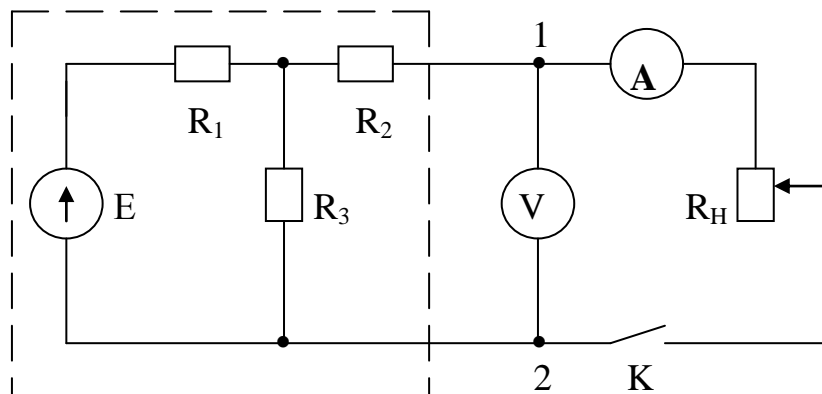


Рис. 2.1.

В качестве переменного сопротивления используется проволочный реостат. Питание осуществляется от сети постоянного тока.

Программа работы

1. Вывод формул для определения параметров эквивалентного генератора E_r и R_r по методу двух нагрузок.
2. Исследование работы активного двухполюсника в режимах холостого хода, короткого замыкания и 6 различных значений сопротивления R_n . Результаты измерений внести в табл. 2. 1.

Примечание. Значение токов при изменении нагрузки брать примерно через равные интервалы.

Таблица 2. 1.

Опыт	I	U_{12}	R_n	E_r	R_r	R_n / R_r	P_n
	A	B	Ом	B	Ом	-	Вт
Холостой ход	0						
1							
2							
3							
4							
5							
6							
Короткое замыкание		0					

3. Определение параметров эквивалентного генератора E_r и R_r по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

4. Определение E_r и R_r по методу двух нагрузок, причем сопротивления выбрать такими, чтобы токи отличались друг от друга не менее, чем в 2 раза.

5. Определение мощности нагрузки P_n и соотношения R_n / R_r для всех значений сопротивлений R_n .

Результаты пп. 3, 4, 5 внести в табл. 2. 1.

6. Построение внешней характеристики $U_{12} = f(I)$ эквивалентного генератора.

7. Определение тока по внешней характеристике генератора при заданном сопротивлении нагрузки R_n (по указанию преподавателя). Определение по

формулам Тевенена-Гельмгольца и Поливанова значения тока нагрузки для того же значения сопротивления.

8. Построение зависимости $P_n = f(R_n / R_r)$ по данным табл. 2. 1. и определение сопротивления нагрузки R_n , при котором в нагрузке выделяется максимальная мощность.

Вопросы

1. Определить аналитически, при каком соотношении между сопротивлением нагрузки R_n и внутренним сопротивлением генератора R_r в нагрузке выделяется максимальная мощность.

2. С помощью метода эквивалентного генератора в общем виде определить ток в нагрузке схемы 2.1.

Литература

1. Л. 4, § 1.24, 1.25.
2. Л. 5, § 2, 12.

Лабораторная работа № 3

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 $R_n = U_2 / I$.

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

Мощности – отдаваемая генератором и потребляемая приемником – вычисляются по формулам $P_1 = U_1 I$; $P_2 = U_2 I = I^2 R_n$.

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. 3. 1.

Генератор Г постоянного тока, служащий для питания приемника R_H , приводится во вращение трехфазным асинхронным двигателем Д. 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 К служит для создания короткого замыкания. Для получения режима холостого хода достаточно вывернуть все лампочки.

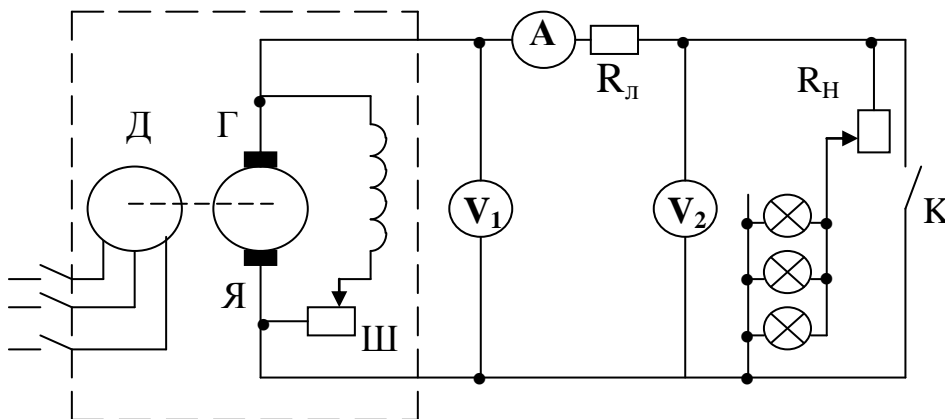


Рис. 3.1.

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. 3. 1.

2. По данным п. 1 вычислить значение мощности P_1 , отдаваемой генератором, мощности P_2 , потребляемой приемником, сопротивления приемника R_n , коэффициента полезного действия передачи энергии η , потери напряжения в линии $I R_{\text{л}}$ и потери мощности в линии $I^2 R_{\text{л}}$.

Результаты расчетов внести в табл. 3. 1.

Таблица 3. 1

Данные опыта			Данные расчета					
U_1	U_2	I	R_n	P_1	P_2	$I R_{\text{л}}$	$I^2 R_{\text{л}}$	η
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. 3.2, аналогичную табл. 3. 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. 4, § 1.26

Лабораторная работа № 4

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

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

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

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. 4, § 3.11, 3.12.

2. Л. 5, § 2.4, 2.5.

Лабораторная работа № 5

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 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. 5.1, которая при разных положениях K_1 , K_2 и K_3 дает различные соединения катушек.

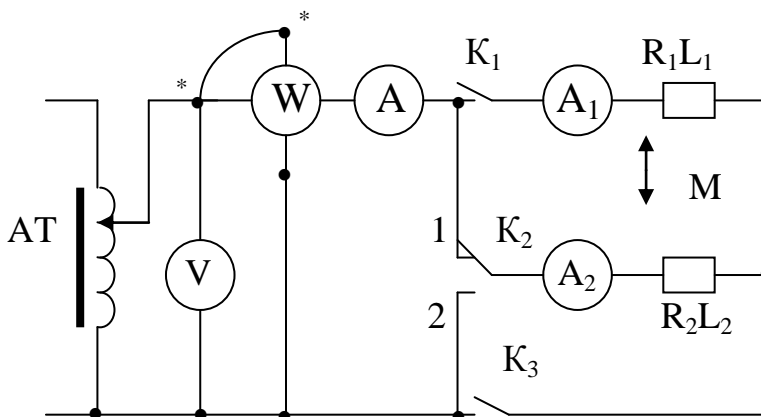


Рис. 5.1.

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. 5.1.

Таблица 5.1

№ 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

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. 5.2. По данным опыта определить взаимную индуктивность.

Таблица 5.2

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. 5.3.

Таблица 5.3

Включение катушек	Данные опыта				
	U	I	I ₁	I ₂	P
	B	A	A	A	Вт
M = 0					
Согласное					
Встречное					

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

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 (I₁ или I₂). 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, § 5-16.
2. Л. 3, § 7-12, 8-2, 8-3, 10-3, 10-4.

Лабораторная работа № 6

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

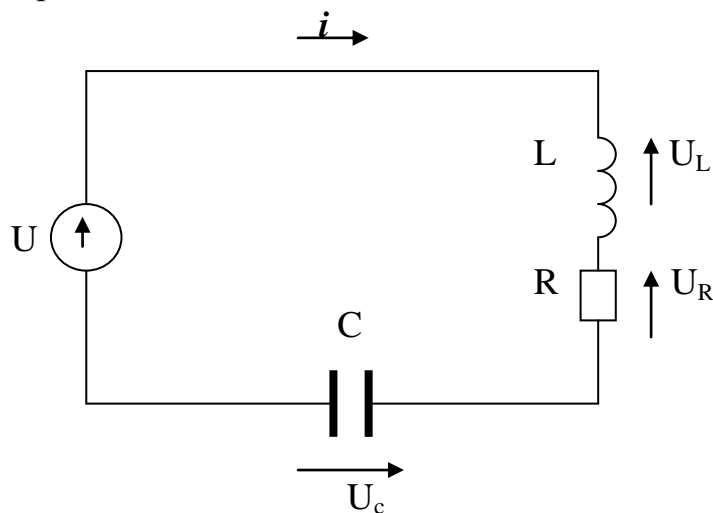


Рис. 6.1

Если к цепи, изображенной на рис. 6.1, 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 ρ 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. 6.2.

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 $R_{ш}$.

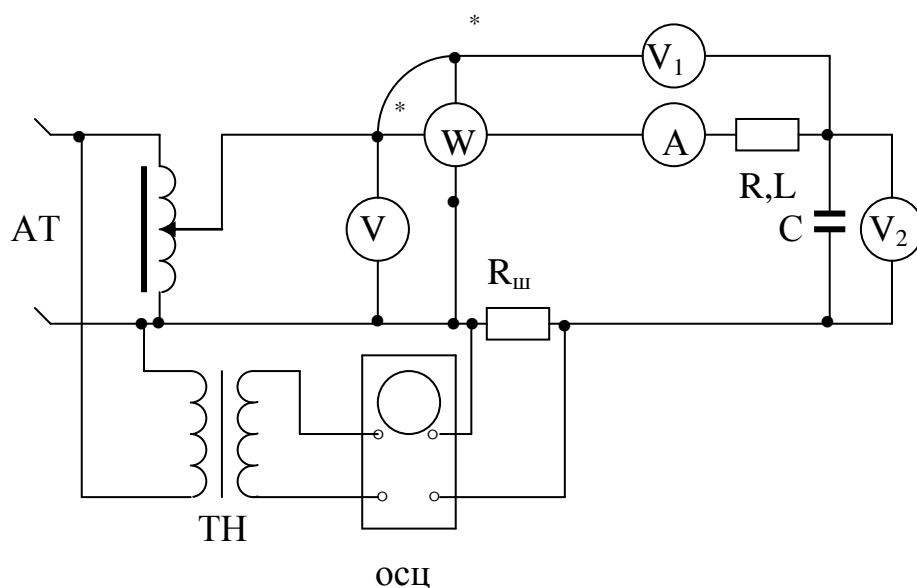


Рис. 6.2

Ваттметр включен таким образом, чтобы в результаты 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 .

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. 6.1.

Таблица 6.1

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

2. Исследование цепи рис. 6.2 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. 6.2.

Таблица 6.2

C	Данные опыта						Данные расчета			
	I	U _c	U _k	P	cosφ	φ	I	tgφ	φ	P
мкФ	А	В	В	Вт	-	град	А	-	град	Вт

3. Построение кривых I, U_c, U_k, 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 опытными данным векторных диаграмм для трех значений емкости, соответствующих $\varphi > 0$; $\varphi = 0$; $\varphi < 0$.

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

$$C_{рез} = 1 / \omega^2 L.$$

Параметры индуктивной катушки, включая и параметры сопротивления R_ш, 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, § 6-1, 6-2.
2. Л. 3, § 9-1.
3. Л. 5, § 3.2.

Лабораторная работа № 7

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.

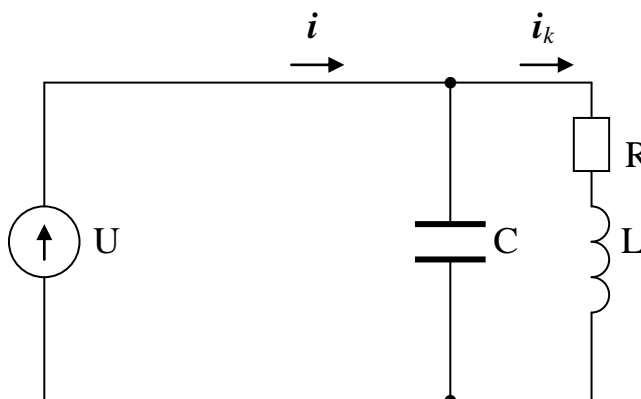


Рис. 7.1

Если к цепи, изображенной на рис. 7.1, 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 ρ 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. 7.2.

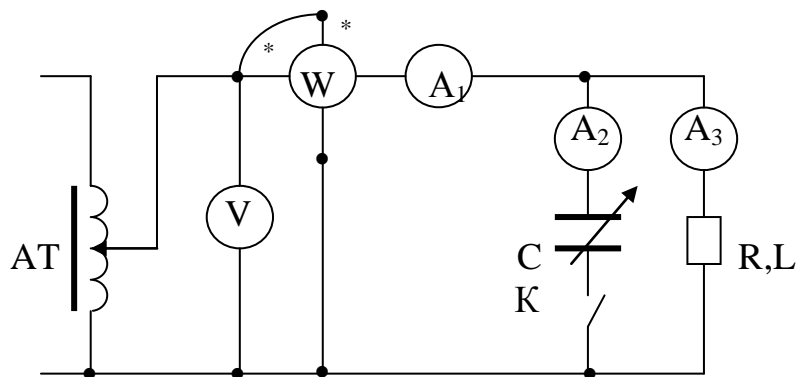


Рис. 7.2

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. 7.1.

Примечание. Для измерения параметров катушки ключ в схеме рис. 7.2 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. 7.2.

Таблица 7.1

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

Таблица 7.2

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

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

Примечание. Данные для построения расчетных кривых внести в табл. 7.2.

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 φ 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 φ ?
3. Как можно достичь резонанса токов?

Литература

1. Л. 1, § 6-1, 6-7.
2. Л. 3, § 9-3.
3. Л. 5, § 3.3.

Лабораторная работа № 8

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, $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$.

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. 8. 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 $U_{\text{л}} / U_{\text{ф}}$.

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. 8. 1.

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

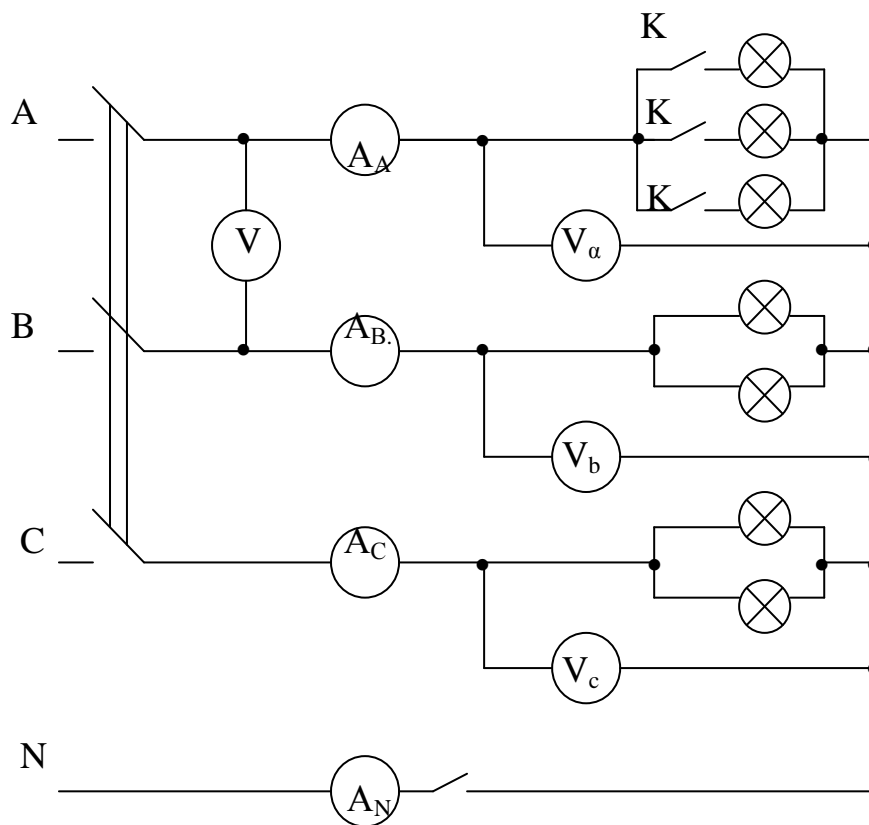


Рис. 8.1.

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. 8.1.

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. 8.1 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 8. 1

Показания приборов							I _N из вектор- ной диаграм- мы	U _{AB} / U _a	U _{AB} / U _b	U _{AB} / U _c	Характер нагрузки фазы А	Примечание
U _a	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 $\phi_{\text{кат}}$ воспользоваться тем, что сумма линейных токов в трехпроводной цепи равна нулю.

3. Соотношения между I_л и I_ф, U_л и U_ф в симметричном приемнике?

Литература

1. Л. 1, § 7-1, 7-2.
2. Л. 3, § 13-2, 13-4, 13-5.
3. Л. 4, § 7.8, 7.11, 7.16.

Лабораторная работа № 9

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_ϕ – 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. 9.1. 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.

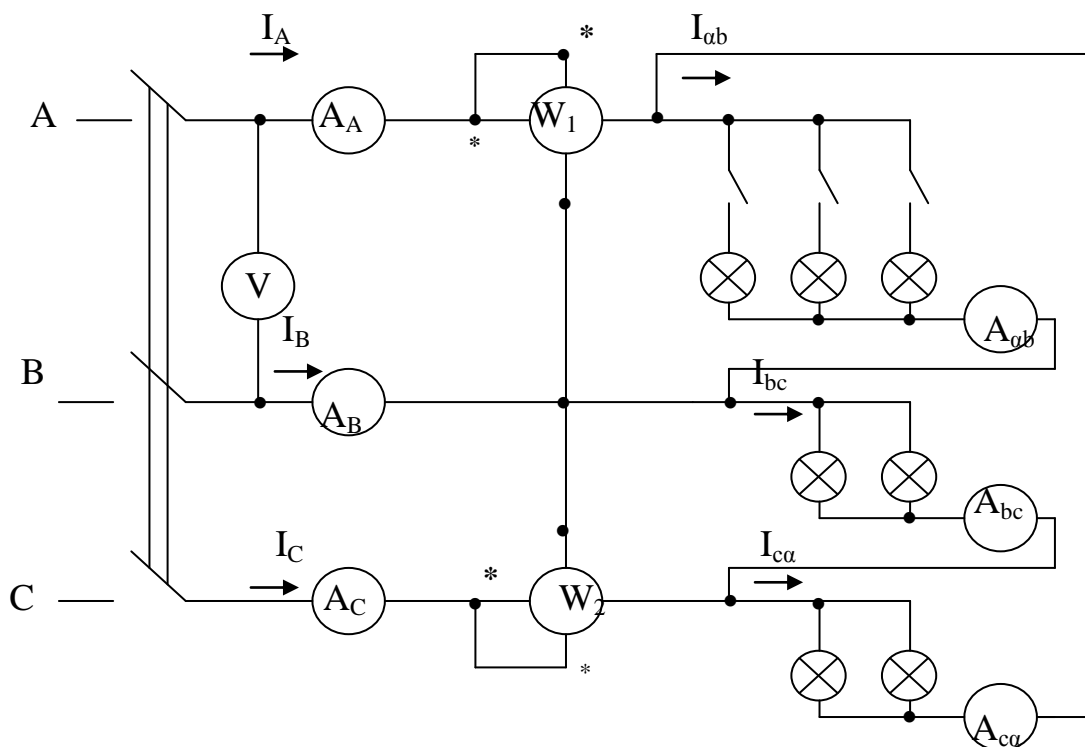


Рис. 9.1

2. Определение показаний приборов при симметричной нагрузке и проверке отношений $I_{\text{л}} / I_{\text{ф}}$. Сравнение значений активной мощности, полученных из опыта и по формуле

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

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. 9.1.

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

Таблица 9.1

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° 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° стрелка одного из ваттметров отклоняется влево от нулевой отметки шкалы?

2. Соотношения между I_L и I_ϕ , U_L и U_ϕ в симметричном приемнике при связывании электрических цепей треугольником?

Литература

1. Л. 1, § 7-1, 7-2.
2. Л. 4, § 7,9; 7,13.

Лабораторная работа № 10

Исследование пассивного четырехполюсника

Цель работы. Исследование работы пассивного четырехполюсника при переменной нагрузке, экспериментальное определение постоянных четырехполюсника, построение круговой диаграммы и использование ее для анализа четырехполюсника.

Пояснения к работе

Пассивный четырехполюсник характеризуется четырьмя коэффициентами A , B , C , D , которые входят в линейные уравнения, связывающие напряжения и токи на входе и выходе четырехполюсника при любой нагрузке на выходных зажимах

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A} \dot{U}_2 + \underline{B} \dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = \underline{C} \dot{U}_2 + \underline{D} \dot{I}_2. \end{cases}$$

Указанные коэффициенты, называемые постоянными четырехполюсника, связаны между собой равенством

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$$

и легко определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания

$$\underline{A} = \sqrt{\underline{Z}_{1xx} / (\underline{Z}_{0xx} - \underline{Z}_{0кз})}; \underline{B} = \underline{A} \underline{Z}_{0кз}; \underline{C} = \underline{A} / \underline{Z}_{1xx}; \underline{D} = \underline{B} / \underline{Z}_{1кз}.$$

Зная фазовый угол, можно по данным опытов холостого хода, короткого замыкания и обратного короткого замыкания построить круговую диаграмму четырехполюсника, облегчающую анализ его работы при различных нагрузках.

В настоящей работе используется Т-образный или П-образный четырехполюсник (рис 10. 1, а, б), сопротивления которого могут быть разными как по величине, так и по характеру.

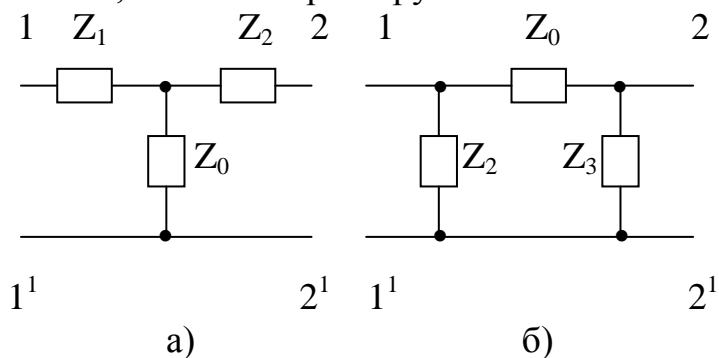


Рис. 10.1

Схема электрической цепи

Для исследования четырехполюсника используется электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 10. 2.

Питание цепи производится от сети переменного тока через автотрансформатор регулировочным реостатом на 150-170 Ом.

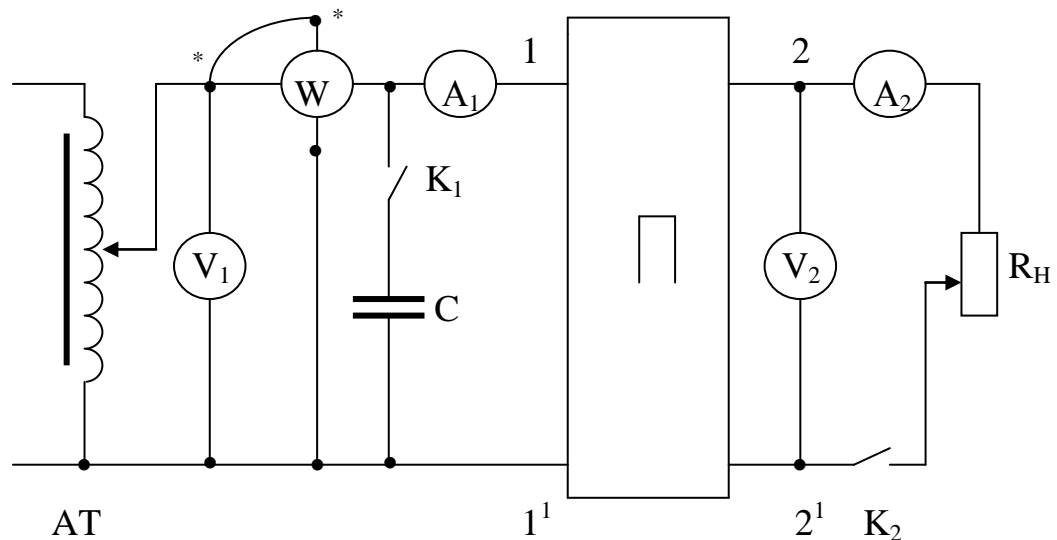


Рис.10.2

Ваттметр служит для измерения мощности на входе четырехполюсника, а также для определения угла сдвига фаз φ_1 между входными напряжением и током. Чтобы определить знак угла, нужно кратковременно включить емкость C , замкнув ключ K_1 . Если при этом показание амперметра A_1 возрастает, угол φ_1 отрицателен, если уменьшится – положителен.

Все измерения проводятся при разомкнутом ключе K_1 . Выходная мощность определяется по показаниям амперметра A_2 и вольтметра V_2 .

Программа работы

1. Экспериментальное определение зависимостей I_1 , P_1 , P_2 , U_2 от тока нагрузки I_2 при постоянном напряжении U_1 и изменении нагрузки от холостого хода ($R_n = \infty$) до короткого замыкания ($R_n = 0$).

Результаты измерений и расчетов при 8 – 10 значениях R_n внести в табл. 10. 1.

2. Определение сопротивлений Z_{0xx} и $Z_{0кз}$ из опытов обратного холостого хода и обратного короткого замыкания. Результаты этих опытов вносятся в табл. 10. 2.

3. Построение по данным опытов холостого хода, короткого замыкания и обратного короткого замыкания круговой диаграммы четырехполюсник

Таблица 10. 1.

Данные расчета				Данные расчета			Примечание
I_1	P_1	U_2	I_2	$\cos\varphi_1$	$P_2 = U_2 I_2$	$R_H = U_2 / I_2$	
А	Вт	В	А	-	Вт	Ом	
							Холостой ход Активная нагрузка Короткое замыкание

4. Определение из круговой диаграммы величин I_1 , P_1 , P_2 , U_2 , I_2 , соответствующих указанному преподавателем значению R_H (из числа имеющих в табл. 10.1), и сравнение их с полученными из опыта.

Таблица 10. 2.

Наименование опыта	Данные опыта			Данные расчета			Примечание
	U_1	I_1	P_1	$\cos\varphi_1$	φ_1	$Z = U_1 / I_1 \cdot e^{j\varphi_1}$	
	В	А	Вт	-	град	Ом	
Обратный ХХ							$Z = Z_{0xx}$
Обратное КЗ							$Z = Z_{0кз}$

Методические указания

1. Чтобы найти рабочую точку круговой диаграммы, нужно провести линию переменного параметра (линию сопротивления), отложив на ней в принятом масштабе заданную величину R_n . Пересечение прямой, проведенной через конец вектора I_{1xx} и конец отложенного на линии сопротивления отрезка, с другой круговой диаграммой даст искомую точку.

2. Масштабы выходных напряжения и тока удобно определять из опытов холостого хода и короткого замыкания

$$m_{U_2} = U_{2xx} / \text{ХК}, m_{I_2} = I_{2кз} / \text{ХК},$$

где ХК – хорда диаграммы, соединяющей концы векторов \dot{I}_{1xx} и $\dot{I}_{1кз}$.

Вопросы

1. Запись уравнений четырехполюсника в системе А – параметров?
2. Как проверить правильность определения коэффициентов четырехполюсника?
3. Объясните изменение входного тока при включении конденсатора С.
4. Понятие симметричного четырехполюсника?
5. Сколько независимых параметров имеет симметричный и несимметричный четырехполюсник?
6. Размерность постоянных А, В, С, D?

Литература

1. Л. 4, § 6.11.
2. Л. 3, § 8-7, 12-4.
3. Л. 5, § 8.2

Лабораторная работа № 11

Исследование цепной схемы

Цель работы. Исследование работы цепной схемы, состоящей из двух одинаковых симметричных четырехполюсников, при их согласованной и несогласованной нагрузках и экспериментальное определение характеристического сопротивления пассивного четырехполюсника.

Пояснение к работе

Пассивный четырехполюсник характеризуется зависимостями

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A} \dot{U}_2 + \underline{B} \dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = \underline{C} \dot{U}_2 + \underline{D} \dot{I}_2, \end{cases}$$

где \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} и \underline{D} – постоянные четырехполюсника, которые можно определить экспериментально по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Указанные постоянные связаны между собой зависимостью

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$$

Для симметричного четырехполюсника эта зависимость принимает вид

$$\underline{A}^2 - \underline{B} \underline{C} = 1,$$

т. к. в этом случае $\underline{A} = \underline{D}$.

При замыкании симметричного четырехполюсника на повторное или характеристическое сопротивление напряжение и ток при переходе от входных зажимов к выходным уменьшаются в e^a раз, а их фазы уменьшаются на величину b .

Величина a называется коэффициентом затухания, а b – коэффициентом изменения фазы четырехполюсника.

Величина $\underline{g} = a + jb$ называется постоянной передачи четырехполюсника.

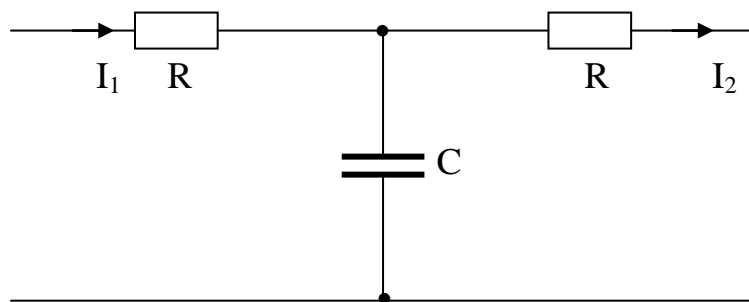


Рис. 11.1

В настоящей работе используется цепная схема, состоящая из двух одинаковых симметричных четырехполюсников, принципиальная схема которых показана на рис. 11.1.

Схема электрических цепей

Определение постоянных четырехполюсника, как указывалось выше, производится по методу холостого хода и короткого замыкания.

Питание осуществляется от сети напряжения 127 или 220 В через автотрансформатор АТ.

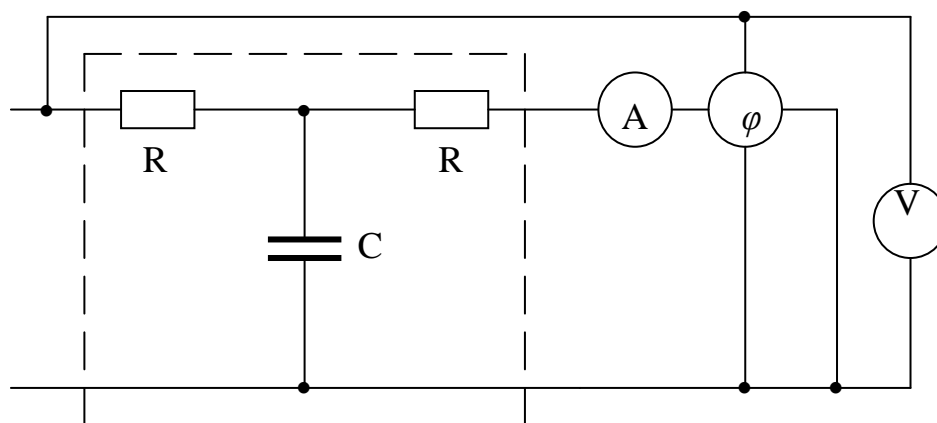


Рис. 11.2

Схема электрической цепи для осуществления опыта короткого замыкания представлена на рис. 11.2. Для определения угла сдвига фаз между напряжением на входе $U_{1кз}$ и током короткого замыкания $I_{2кз}$ в цепь включен фазометр φ .

Схема электрической цепи для осуществления опыта холостого хода представлена на рис. 11.3.

В цепь включен фазометр φ для определения разности фаз между напряжением $U_{1хх}$ на входе и напряжением $U_{2хх}$ на выходе четырехполюсника.

Величина напряжения измеряется вольтметром, подключенным к параллельной обмотке фазометра.

Стрелкой n обозначен свободный коней проводника, прикасаясь которым к входному или выходному зажиму цепи, можно измерить соответствующие напряжения.

Схема электрической цепи для исследования цепной схемы представлена на рис. 11.4.

Цепная схема составлена из двух одинаковых симметричных Т-образных четырехполюсников.

Пользуясь фазометром и вольтметром, можно измерить напряжение U_1 , U_2 и U_3 и их фазы по отношению к току I_1 (для этого контакт n поочередно присоединяется к зажимам 1, 2, и 3). Нагрузка цепной схемы состоит из конденсатора C_n и активного сопротивления R_n , включенных параллельно.

Фазометр может быть заменен ваттметром. В этом случае угол находится как $\arccos P / U I$, а для определения знака нужно предварительно построить примерную векторную диаграмму.

Таблица 11.1

Опыт	U_1	I_1	ψ_1	U_2	I_2	ψ_2
	В	А	град	В	А	град
КЗ		-		0		-
ХХ					0	

Примечание. Опыт КЗ проводить при напряжении $U_1 \leq 50$ В.

2. Вычисление значений R_H и C_H , соответствующих режиму согласованной нагрузки.

3. Исследование цепной схемы при согласованной и несогласованной нагрузках. Определение по опытным данным коэффициента затухания α , коэффициента фазы b и постоянной передачи g . Данные опыта и расчета внести в табл. 11.2 и построить по этим данным векторные диаграммы, соответствующие $Z_H = Z_c$ и $Z_H \neq Z_c$.

4. Вычисление постоянных \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , повторного сопротивления \underline{Z}_c , постоянной передачи g , коэффициента затухания α и коэффициента изменения фазы b по известным параметрам четырехполюсника.

Основные соотношения

По данным холостого хода определяются коэффициенты

$$\underline{A} = \dot{U}_{1xx} / \dot{U}_{2xx} = U_{1xx} e^{j\psi_1} / U_{2xx} e^{j\psi_2} = \alpha e^{j(\psi_1 - \psi_2)},$$

$$\underline{C} = \dot{I}_{1xx} / \dot{U}_{2xx} = I_{1xx} / U_{2xx} e^{j\psi_2} = c e^{-j\psi_2}.$$

По данным опыта короткого замыкания определяется коэффициент

$$\underline{B} = \dot{U}_{1кз} / \dot{I}_{2кз} = U_{1кз} e^{j\psi} / I_{2кз} = b e^{j\psi}.$$

В опыте короткого замыкания угол ψ получается положительным и должен учитываться со знаком плюс.

Таблица 11.2

Условия опыта	Данные опыта							Данные расчета									
	I	U ₁	U ₂	U ₃	ψ ₁	ψ ₂	ψ ₂	Z ₁ = =U ₁ /I	b ₁	b ₂	α ₁	α ₂	g ₁	g ₂	b _{общ}	α _{общ}	g _{общ}
	A	B	B	B	град												
Z _H = Z _C																	
Z _H ≠ Z _C																	

В остальных опытах углы ψ , измеряемые фазометром, получаются емкостными и, следовательно, должны учитываться со знаком минус.

Постоянные A , B , C четырехполюсника можно также вычислить по известным параметрам четырехполюсника из соотношений

$$\begin{aligned}\underline{A} &= 1 + j\omega CR; \\ \underline{C} &= j\omega C = Ce^{j90^\circ}; \\ \underline{B} &= 2R + j\omega CR^2.\end{aligned}$$

Повторное сопротивление Z_c определяется из выражения

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{B} / \underline{C}} = Z_c e^{j\theta}$$

Коэффициент распространения четырехполюсника \underline{g} , определяется из выражений

$$\underline{g} = \ln(\underline{A} + \sqrt{\underline{B} \underline{C}}) = \ln e^{(\alpha + j b)} = \alpha + j b,$$

где α – коэффициент затухания, b – коэффициент фазы.

Исходя из опытных данных, величины α и b каждого звена определяются при $Z_n = Z_c$ из соотношений

$$\alpha = \ln(U_1 / U_2) = \ln(U_2 / U_3); b = \psi_1 - \psi_2 = \psi_2 - \psi_3,$$

где ψ_1 , ψ_2 и ψ_3 – сдвиг векторов напряжений U_1 , U_2 и U_3 по отношению к току I_1 . Соответствующие коэффициенты цепной схемы, состоящей из двух звеньев, будут вдвое больше.

Вычисление сопротивления нагрузки, равного характеристическому сопротивлению, можно произвести, пользуясь следующими соотношениями:

$$\underline{Y}_c = 1 / Z_c = g + j b,$$

откуда

$$R_n = 1 / g_n; C_n = b / \omega.$$

Методические указания

1. При включении фазометра или ваттметра необходимо обращать внимание на правильность соединения генераторных зажимов, обозначенных звездочкой.

2. Угол ψ , определяемый по показанию фазометра или заменяющего его ваттметра, является аргументом комплекса соответствующего напряжения.

Вектор же тока во всех случаях принимается расположенным по вещественной оси.

Вопросы

1. Что понимают под цепной схемой?
2. Что такое повторное, или характеристическое, сопротивление?
3. Что показывают постоянная переменная g и коэффициенты α и β ?

Литература

1. Л. 1, § 14 - 1
2. Л. 5, § 8.2

Лабораторная работа № 12

Электрические цепи, содержащие источник несинусоидального напряжения

Цель работы. Изучение влияния реактивной катушки и влияния конденсатора на кривую тока при несинусоидальном напряжении, приложенном к цепи.

Пояснение к работе

Если к цепи приложено несинусоидальное напряжение, то кривая тока будет воспроизводить кривую напряжения лишь в том случае, когда сопротивление цепи чисто активное. Если включена реактивная катушка или конденсатор, то кривая тока будет отличаться от кривой напряжения. Объясняется это тем, что при включении реактивной катушки сопротивление ее k -й гармоники равно

$$Z_k = \sqrt{R^2 + k^2 \omega^2 L^2}.$$

Отсюда следует, что по мере увеличения порядка гармоники, сопротивление катушки будет увеличиваться, амплитуда тока соответствующей гармоники будет уменьшена, и кривая тока будет меньше искажена, чем кривая приложенного напряжения.

Наоборот, при включении конденсатора сопротивление его k -й гармоники будет равно

$$Z_k = \sqrt{R^2 + 1 / k^2 \omega^2 C^2},$$

т. е. по мере увеличения порядка гармоники сопротивление конденсатора будет уменьшаться и амплитуда тока соответствующей гармоники будет увеличена, в результате чего кривая тока окажется более искаженной, чем кривая приложенного к цепи напряжения.

В настоящей работе питание цепи осуществляется от вторичной обмотки трансформатора, последовательно с первичной обмоткой которого включено сопротивление R_1 порядка 1000 Ом, как указано на рис.12.1

Приложенное к схеме напряжение сети синусоидально, поэтому при большом линейном сопротивлении R_1 ток через первичную обмотку трансформатора будет также синусоидальным. Но при протекании синусоидального тока по катушке индуктивности с железным сердечником (а трансформатор – это катушка с сердечником) на ее зажимах возникает несинусоидальное напряжение.

На вторичной обмотке трансформатора будет напряжение, пропорциональное по величине и подобное по форме первичному. Оно и используется для питания цепи.

Схема электрической цепи

В настоящей работе используется электрическая цепь, показанная на рис. 12. 1.

Питание всей цепи осуществляется от сети напряжением 220 В. К вторичной обмотке трансформатора Т, на зажимах которой получается несинусоидальное напряжение, при помощи переключателя K_1 можно включить последовательно реактивную катушку L или конденсатор С.

Несинусоидальный ток цепи создает на активном сопротивлении R_2 такое же несинусоидальное напряжение, кривую которого можно наблюдать на экране катодного осциллографа.

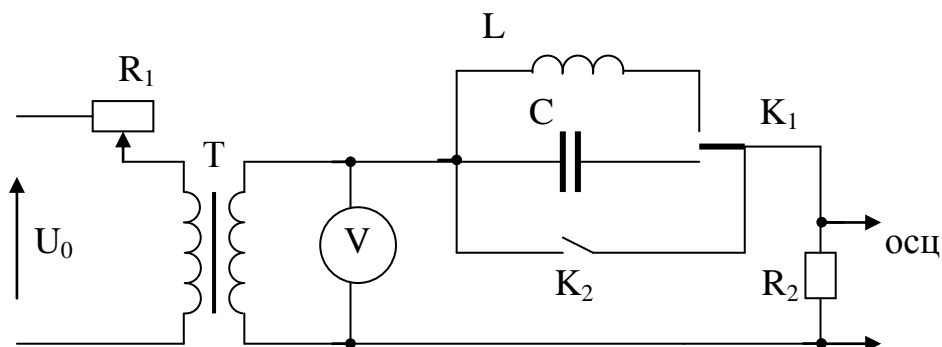


Рис. 12.1

Для определения величины тока необходимо градуировать осциллограф. Градуировку нужно произвести при синусоидальном напряжении, для чего

полностью выводят реостат R_1 и замыкают ключ K_2 , замыкая накоротко катушку и конденсатор. Так как реостат выведен, то во вторичной обмотке трансформатора будет индуцироваться чисто синусоидальное напряжение, которое может быть измерено вольтметром. Определив амплитуду этого напряжения по кривой на экране осциллографа, находят масштаб кривой в единицах напряжения из соотношения

$$m_U = U\sqrt{2} / y \text{ В/мм},$$

где U – показание вольтметра, y - амплитуда синусоидального напряжения в миллиметрах.

Величину тока в цепи можно затем определить по показанию осциллографа и величине сопротивления R_2 из равенства

$$i = m_V / R_2 \text{ у.}$$

Масштаб для кривой тока

$$m_i = m_V / R_2 \text{ (А / мм)}.$$

Программа работы

1. Градуировка осциллографа в единицах напряжения.
2. Снятие осциллограммы несинусоидального напряжения, индуцируемого во вторичной обмотке трансформатора T при полностью введенном реостате R_1 (ключ K_2 должен быть замкнут).
3. Снятие осциллограммы тока в цепи при включенной индуктивности L .
4. Снятие осциллограммы тока в цепи при включенной емкости C .
5. Разложение кривой напряжения, полученной в п. 2, и кривой тока, полученной в п. 4, по методу Чебышева на гармоники не выше пятой.

Методические указания

1. Ввиду того, что осциллограммы, полученные на экране осциллографа, имеют небольшие размеры, необходимо их пропорционально увеличить в 3 или 5 раз. В соответствии с этим изменится и величина масштаба по напряжению и току. Так, например, при увеличении кривых в 5 раз масштаб как напряжения, так и тока уменьшится в 5 раз.

2. Величина R_2 измеряется с помощью моста.

Вопросы

1. Как вычисляется действующее значение несинусоидального тока и напряжения?

2. Какие формулы применяются для определения активной и реактивной мощностей в цепях с несинусоидальными токами и напряжениями?

Литература

1. Л. 1, § 8.2, 8.3, 8.4
2. Л. 4, § 8.8, 8.11

Лабораторная работа № 13

Исследование переходных процессов при подключении цепи к источнику постоянного напряжения

Цель работы. Экспериментальное снятие кривой переходного процесса в цепи R , L , C при включении этой цепи на постоянное напряжение при различных значениях сопротивления R .

Пояснение к работе

Переходные процессы в цепи с емкостью и индуктивностью протекают настолько быстро, что экспериментальное исследование этих процессов связано с определенными трудностями. Если переходный процесс происходит один раз, то обычно кривую изменения тока или напряжения фотографируют с экрана осциллографа на фотопленку. Этот метод по ряду причин в нашей лаборатории применить затруднительно. Однако кривую тока переходного процесса можно срисовать с экрана осциллографа; для этого переходный процесс приходится многократно повторять, а чтобы изображение на экране не плавало, необходимо развертки согласовать с частотой повторяемости переходного процесса. В качестве регистрирующего прибора можно применить магнитоэлектрические шлейфовые или катодные осциллографы.

Мы будем пользоваться катодным осциллографом с двухлучевой приставкой к нему.

Схема электрической цепи

Последовательная цепь R , L , C , параметры которой указаны на лабораторном оборудовании, включается на постоянное напряжение U с помощью контакта K_1 (рис. 13.1). Этот контакт замкнут определенное время, в течение которого переходный процесс успевает затухнуть. Затем он размыкается, и, спустя некоторое время, замыкается контакт K_2 , в результате чего конденсатор быстро разряжается на сопротивление R_6 . Контакт K_2 размыкается и схема готова к повторному включению, что и осуществляется

опять замыканием контакта K_1 . В такой последовательности контакты работают непрерывно.

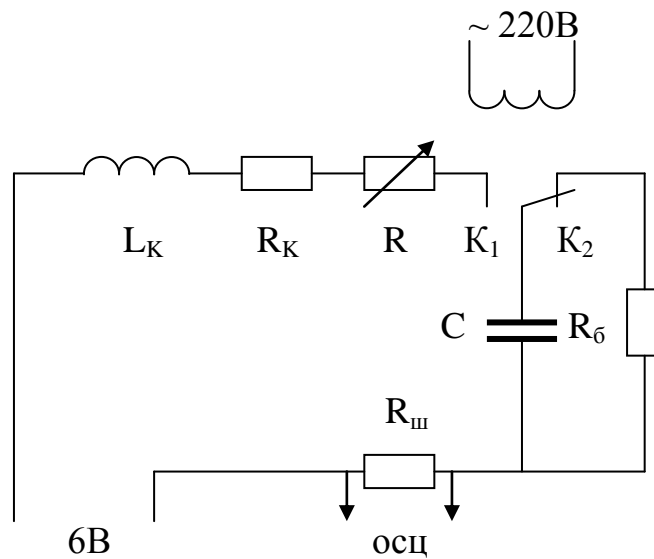


Рис. 13.1

Напряжение, пропорциональное току переходного процесса, с шунта $R_{ш}$ подается на пластины осциллографа, и благодаря многократному повторению на его экране видна неподвижная кривая переходного процесса.

Однако изображение будет устойчивым, если частота горизонтальной развертки осциллографа будет синхронна частоте повторяемости процесса. Это достигается за счет того, что в работе используется для переключения контактов поляризованное реле, яркость которого колеблется с частотой питающего напряжения (50 Гц). Так как схема синхронизации осциллографа управляется этим же напряжением, то на экране мы можем наблюдать неподвижную картину переходного процесса.

Программа работы

1. Ознакомиться со схемой эксперимента, включить ее в сеть, подключить осциллограф и рабочее постоянное напряжение.

2. Установив на экране достаточно четкое изображение переходного процесса, наложить на экран лист бумаги и карандашом свести кривую. При этом следует отметить на бумаге масштаб времени, учитывая, что процесс повторяется с частотой цепи (время одного полупериода 0,01 с).

Кривую следует снимать для трех значений сопротивления $R_0 = R_K + R_{ш} + R$ (R_K – активное сопротивление катушки индуктивности), изменяя его с помощью реостата R . Это сопротивление нужно выбирать так, чтобы переходный процесс был все время периодическим.

3. При определенной величине сопротивления R_0 колебательный процесс переходит в апериодический. Это критическое значение сопротивления следует замерить и затем определить его теоретически по

параметрам индуктивности и емкости. Снять кривую переходного тока при $R_0 = R_{кр}$.

4. Дома перерисовать кривые на миллиметровку, нанести масштаб времени и определить следующие величины:

- а) период затухающих колебаний и угловую частоту;
- б) декремент колебания

$$\Delta = i_1(t) / i_1(t + T) = I_1 e^{-\beta t} / I_1 e^{-\beta(t+T)} = e^{\beta T}.$$

Декремент колебания представляет собою отношение двух значений тока, отстоящих друг от друга на один период;

в) логарифмический декремент колебания

$$\delta = \ln \Delta = \beta T.$$

5. Подсчитать величины п. 4 (а, б, в) теоретически и сравнить с полученными экспериментальными данными.

Результаты п. 5 вносятся в табл. 13.1.

Таблица 13.1

R	R_0	T	$\beta = R_0 / 2L$	$\delta_{расч} = \beta T$	I_{1m} / m_i	I_{2m} / m_i	$\Delta = I_{1m} / I_{2m}$	$\Delta_{on} = \ln \Delta$
Ом	Ом	с	c^{-1}		мм	мм		

Основные соотношения

Ток переходного процесса при включении цепи на постоянное напряжение находится так (колебательный режим):

$$i(t) = (U e^{-\beta t} / \omega L) \sin \omega t,$$

где

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}; \quad \omega_0 = 1 / \sqrt{LC}; \quad \beta = R_0 / 2L.$$

Критическое сопротивление соответствует равенству

$$\beta = \omega_0,$$

откуда

$$R_{кр} = 2\sqrt{L / C}.$$

Вопросы

1. Условия возникновения колебательного и апериодического разрядов.
2. Понятие декремента колебания?
3. Что такое логарифмический декремент колебания?

Литература

1. Л. 1, § 9.6.
2. Л. 3, § 18-9, 18-13.

Лабораторная работа № 14

Исследование нелинейного резонанса при последовательном соединении

(Феррорезонанс напряжений)

Цель работы. Экспериментальное исследование феррорезонансной цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора.

Пояснение к работе

Резонанс в цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора называется феррорезонансом напряжений. Характерно, что феррорезонанс для данной катушки может быть достигнут не только за счет изменения величины емкости и частоты напряжения источника, но и путем изменения амплитуды этого напряжения. Такое явление принципиально невозможно в линейных цепях.

Точный анализ явления феррорезонанса представляет значительные трудности и для его упрощения реальные несинусоидальные кривые напряжений и токов часто заменяют эквивалентными синусоидами. Катушку в этом случае считают условно-нелинейным элементом и в расчете используют ее вольтамперную характеристику для действующих значений, примерная форма которой показана на рис. 14.1.

Если не учитывать потерь в цепи, то напряжение на ее зажимах не будет содержать активной составляющей

$$\dot{U} = \dot{U}_P = \dot{U}_L + \dot{U}_C \text{ или } U_P = |U_L - U_C|,$$

так как напряжение на индуктивности U_L опережает ток I на угол $\pi / 2$, а напряжение на емкости U_C отстает от тока на тот же угол.

Вольтамперная характеристика емкости имеет вид прямой, проходящей через начало координат (рис. 14.1). на том же рисунке построена и характеристика всей цепи, соответствующая уравнению

$$U_p(I) = | U_L(I) - I/\omega C |.$$

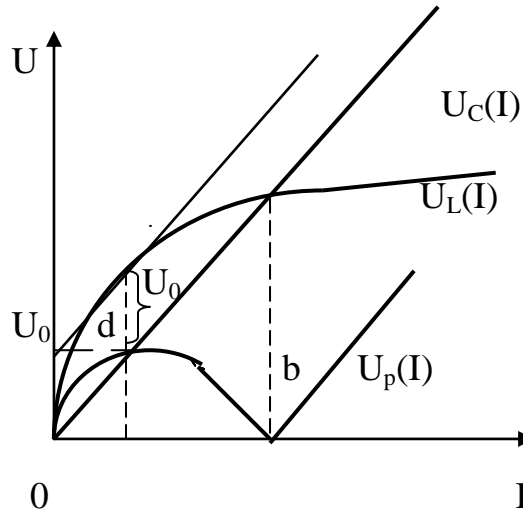


Рис. 14.1

Точка b этой характеристики и соответствует режиму резонанса напряжений. Точка d является экстремальной точкой характеристики $U_p(I)$, поэтому здесь

$$dU_p(I) / dI = dU_L(I) / dI - dU_C(I) / dI = 0$$

или

$$dU_L(I) / dI = 1/\omega C,$$

т.е. наклон касательной к кривой $U_L(I)$ в точке d равен наклону вольтамперной характеристики конденсатора. При этом касательная отсекает на оси ординат отрезок U_0 , равный напряжению U в точке d . Эти соображения позволяют подобрать такую емкость, которая бы обеспечивала заданное экстремальное значение напряжения. Для этого нужно из точки на оси напряжений с координатой, равной заданному напряжению U_0 , провести касательную к известной вольтамперной характеристике катушки $U_L(I)$. Затем из начала координат провести прямую, параллельную касательной – это и будет вольтамперная характеристика искомой емкости. В каждой точке этой характеристики

$$U_C(I) / I = X_C = 1/\omega C,$$

откуда легко находится значение емкости.

В реальной катушке имеются активные потери (в стали и в меди). Если учесть их постоянным сопротивлением R , включенным последовательно с катушкой, то в приложенном напряжении будет активная составляющая

$U_a = IR$. Тогда $U^2 = U_a^2 + U_p^2$, так как на векторной диаграмме U_a и U_p являются катетами треугольника, гипотенуза которого U . Кривая $U(I)$ и прямая $U_a(I)$ показаны на рис 14.2.

Экспериментально кривую $U(I)$ можно снять только при питании от источника тока. Если же питание осуществляется от источника напряжения, то при плавном изменении действующего значения напряжения в цепи наблюдается релейный (триггерный) эффект. Плавное увеличение действующего значения напряжения от нуля при $U = U_1$ вызывает скачкообразное увеличение действующего значения тока с I_1 до I_2 . Плавное уменьшение напряжения с $U > U_1$ при $U = U_2$ приводит к скачку тока с I_3 до I_4 . Одновременно происходят и скачкообразные изменения угла сдвига фаз между эквивалентными синусоидами напряжения и тока в цепи.

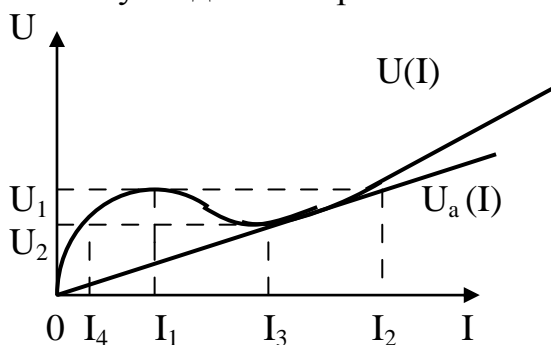


Рис. 14.2

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой изображена на рис. 14.3. Для питания феррорезонансного контура, составленного из катушки со стальным сердечником и линейного конденсатора C , используется активный двухполюсник, ограниченный на схеме пунктирным прямоугольником. Этот двухполюсник может работать как в режиме источника напряжения, так и в режиме источника тока.

В первом случае ключ K находится в положении 1, замыкая накоротко катушку L_0 и размыкая ветвь с емкостью C_0 , т. е. питание происходит непосредственно от автотрансформатора, который подключается к сети переменного тока. Внутреннее сопротивление источника, эквивалентного этой схеме, мало по сравнению с эквивалентным сопротивлением исследуемого контура, поэтому изменение последнего практически не влияет на выходное напряжение источника. Чтобы создать источник тока, ключ K следует перебросить в положение 2, включив, таким образом, в цепь L_0 и C_0 , которые подбираются по условию резонанса в линейной цепи ($\omega^2 L_0 C_0 = 1$) и параметры которых указываются в паспорте работы.

При этом внутренняя проводимость источника, эквивалентного этой схеме, мала по сравнению с эквивалентной проводимостью феррорезонансного контура, поэтому изменение последней практически не влияет на выходной ток источника. Изменение выходных напряжения и тока в обоих случаях производится с помощью автотрансформатора.

Для измерения напряжения на конденсаторе используется вольтметр электростатической системы; остальные приборы – электродинамические. Для наблюдения формы кривой тока на вход электронного осциллографа подается напряжение с зажимов амперметра, играющего роль шунта.

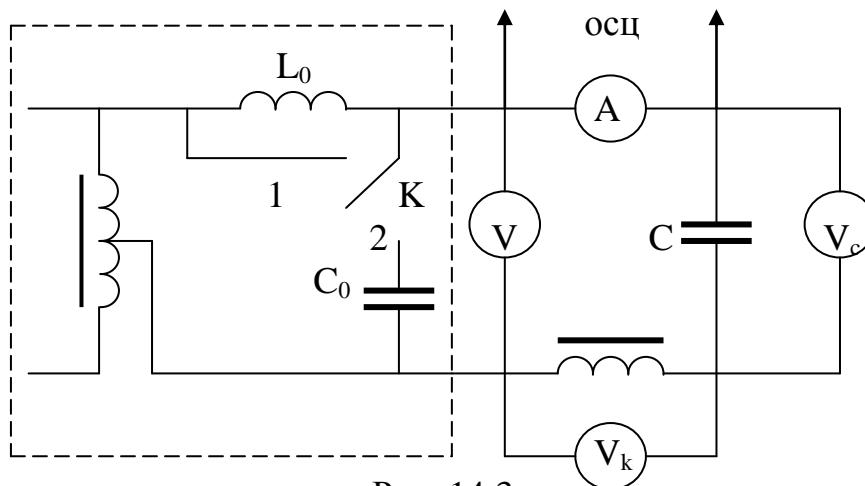


Рис. 14.3

Программа работы

1. Временно замкнув накоротко конденсатор С, снять вольтамперную характеристику катушки со стальным сердечником при питании от источника напряжения (ключ К в положении 1). Данные измерений (6-8 точек) внести в табл. 14.1

Таблица 14.1

U_k	В								
I	А								

2. Построить вольтамперную характеристику катушки по данным п. 1.

3. Пренебрегая влиянием потерь в цепи и наличием высших гармоник, рассчитать, какую емкость надо включить последовательно с катушкой, чтобы экстремальное значение напряжения (напряжение скачка) оказалось равным заданному преподавателем ($30 \div 50$ В).

4. Определив величину емкости, построить ее вольтамперную характеристику и идеализированную характеристику всей цепи на том же графике, что и в п. 2. Оценить, с какого значения ток увеличится скачком.

5. Убрать с конденсатора С закоротку, установить на нем значение емкости, близкое к расчетному.

6. Собрав схему источника тока (ключ К в положении 2), снять зависимости $U(I)$, $U_k(I)$, и $U_c(I)$ при плавном изменении тока. Результаты измерений внести в табл. 14.2.

Таблица 14.2

U	I	U_k	U_c	Примечание
В	А	В	В	
				Плавное изменение тока ($6 \div 8$ точек)
				Плавное увеличение напряжения ($6 \div 8$ точек)
				Плавное уменьшение напряжения ($6 \div 8$ точек)

7. По данным п. 6 построить кривые $U(I)$, $U_k(I)$, и $U_c(I)$ на том же графике, что и кривые пп. 2 и 4. Сравнить экспериментальные кривые с расчетными.

8. Перейдя к схеме источника напряжения (ключ К в положении 1), снять те же зависимости, что и п. 6 при плавном увеличении, а затем и при плавном уменьшении напряжения. Результаты также внести в табл. 14.2 (в том числе и для напряжений, при которых происходят скачки – по два значения тока для одного напряжения).

9. По данным п. 8 построить кривые $I(U)$, $U_k(U)$, $U_c(U)$. Стрелками указать направление изменения напряжения на участках, соответствующих скачкам тока.

10. Пронаблюдать кривые тока до и после скачков на экране осциллографа.

Вопросы

1. При всякой ли емкости можно изменением общего напряжения получить режим феррорезонанса напряжений?

2. Объяснить, почему явление скачка тока в феррорезонансной цепи называют также опрокидыванием фазы?

3. Объяснить отличие экспериментальной и расчетной вольтамперных характеристик цепи.

4. Как по характеристике реальной цепи определить активное сопротивление, считая его неизменным и включенным последовательно в цепь?

5. Обосновать возможность применения феррорезонансной цепи для стабилизации напряжения.

Литература

1. Л. 2, § 3 - 11.
2. Л. 3, § 23 - 12.
3. Л. 4, § 9.56 – 9.59.

Лабораторная работа № 15

Исследование нелинейного резонанса при параллельном соединении

(Феррорезонанс токов)

Цель работы. Экспериментальное исследование феррорезонансной цепи, состоящей из параллельно соединенных катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора.

Пояснение к работе

Резонанс в цепи, состоящий из параллельно соединенных катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора, называется феррорезонансом токов. В отличие от линейной цепи, где для конкретной катушки условия резонанса можно выполнить, изменяя величину емкости или частоту тока, феррорезонанс достигается также и при изменении амплитуды тока.

Если рассматриваемую цепь питать от источника синусоидального напряжения, то ток i_C в конденсаторе, емкость которого C не зависит от напряжения, будет, очевидно, также синусоидальным. Ток i_k в катушке, которая является нелинейным безынерционным элементом, будет, кроме основной, содержать и высшие нечетные гармоники. Четные должны отсутствовать в силу симметрии веберамперной характеристики катушки $\psi(i_k)$. В соответствии с первым законом Кирхгофа ток источника $i = i_k + i_C$ должен содержать те же высшие гармоники, что и i_k , причем с теми же амплитудами и начальными фазами.

Вольтамперная (для действующих значений) характеристика феррорезонансной цепи, снятая при плавном изменении напряжения источника, имеет падающий участок. Действующее значение тока можно приближенно определить, учитывая лишь первую и третью гармоники

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2}.$$

Ток в емкости опережает напряжение на угол $\pi / 2$, первая гармоника тока в катушке за счет наличия потерь отстает от напряжения на угол $0 < \varphi_k < \pi / 2$ и ее можно разложить на активную I_{k1a} и реактивную I_{k1p} составляющие. Тогда

$$I_1 = \sqrt{I_{k1a}^2 + (I_{k1p} - I_C)^2}.$$

Полагая в первом приближении, что минимум тока I наступает при взаимной компенсации реактивной составляющей I_{k1p} и тока в конденсаторе (резонанс токов на основной гармонике), можно найти действующее значение тока третьей гармоники по формуле, вытекающей из двух предыдущих

$$I_3 = \sqrt{I_{min}^2 - I_{k1a}^2}.$$

Активная составляющая первой гармоники тока в катушке выражается через активную мощность, которая при синусоидальном напряжении не зависит от наличия высших гармоник в кривой тока

$$I_{k1a} = P / U,$$

где U – действующее значение напряжения источника.

Если же цепь питать от источника синусоидального тока, то напряжение на ее зажимах будет несинусоидальным и токи i_x и i_C будут содержать высшие гармоники, причем амплитуды соответствующих гармоник обоих токов должны быть равны, а их фазы должны отличаться на угол π (это следует из первого закона Кирхгофа).

При плавном изменении тока источника нельзя экспериментально получить неустойчивый падающий участок вольтамперной характеристики цепи: наблюдается релейный (триггерный) эффект, т. е. скачкообразное изменение напряжения, когда действующее значение тока соответствует экстремальным точкам характеристики.

Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 15.1. Здесь предусмотрена возможность питания феррорезонансного контура как от источника напряжения (ключ K в положении 1), так и от источника тока (ключ K в положении 2). Изменение выходных параметров источника производится с помощью автотрансформатора, который подключается к сети переменного тока.

Измерение тока, напряжения и мощности производится приборами электродинамической системы.

Для наблюдения формы кривой тока на вход электронного осциллографа подается напряжение с зажимов амперметра, который в этом случае выполняет роль шунта.

Программа работы

1. Собрать схему рис. 15.1 и, временно разомкнув цепь конденсатора C , снять 6-8 точек вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником (ключ в положении 1).

2.

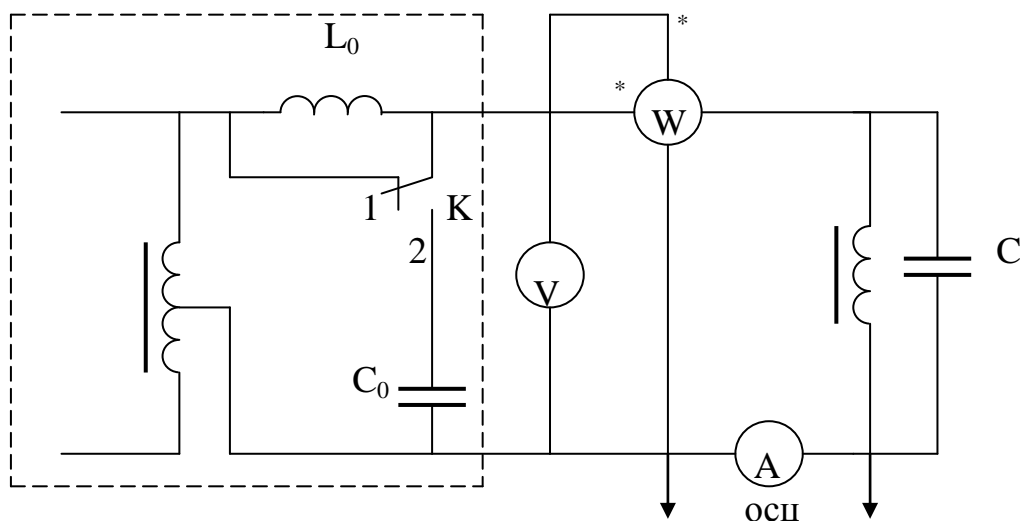


Рис. 15.1

Результаты измерений внести в табл. 15.1.

Таблица 15.1

I_k	A								
U	B								

3. Построить вольтамперную характеристику катушки $I_k(U)$ по данным п. 1. На этом же графике построить линейную вольтамперную характеристику конденсатора $I_C(U)$, емкость которого C задается преподавателем. Построить также идеализированную характеристику всей цепи $I_p(U)$, пренебрегая активным сопротивлением катушки и заменяя несинусоидальные кривые тока i и i_k эквивалентным синусоидами.

4. Снять вольтамперную характеристику цепи при плавном изменении напряжения (ключ K в положении 1). При прохождении тока через минимум записать показания ваттметра.

Результаты измерений (6-8 точек) внести в табл. 15.2.

4. Снять вольтамперную характеристику цепи при плавном увеличении, а затем и при плавном уменьшении тока в цепи (ключ К в положении 2).

Результаты измерений (6-8 точек, включая значения тока при скачках напряжения) также внести в табл. 15.2.

5. Во всех экспериментах следует наблюдать форму кривой тока на экране осциллографа.

6. Построить зависимость $I(U)$ по данным п. 3 на том же графике, что и идеализированную характеристику.

7. Построить характеристики $U(I)$ по данным п. 4. На участках графика, соответствующих скачкам напряжения, стрелками указать направление перемещения рабочей точки.

8. По результатам измерений п. 4 определить действующее значение тока третьей гармоники, считая, что гармониками более высоких порядков можно пренебречь.

Таблица 15.2

Плавное изменение напряжения		Плавное увеличение тока		Плавное уменьшение тока	
I	U	I	U	I	U
A	B	A	B	A	B

Вопросы

1. При всякой ли емкости можно изменением тока источника получить режим феррорезонанса токов?

2. Объяснить отличие идеализированной и реальной вольтамперных характеристик феррорезонансной цепи.

Литература

1. Л. 2, § 3-12.
2. Л. 3, § 23-12.
3. Л. 4, § 9.60, 9.61.

Лабораторная работа № 16

Исследование магнитного усилителя

Цель работы. Исследование свойств магнитного усилителя и определение его основных характеристик.

Пояснение к работе

Магнитными усилителями принято называть ферромагнитные устройства с подмагничиванием постоянным током, которые позволяют управлять значительной мощностью в приемнике при незначительной мощности в управляющей цепи. Действие их основано на использовании явления ферромагнитных материалов.

Принципиальная схема простейшего усилителя показана на рис. 16.1. Рабочей цепью усилителя служат две одинаковые обмотки переменного тока с числом витков W_p каждая, расположенные на крайних стержнях ферромагнитного сердечника и соединенные последовательно. На среднем стержне находится обмотка управления с числом витков W_y , питаемая постоянным током.

Параметры рабочей цепи подобраны таким образом, что при отсутствии управляющего тока ($I_y = 0$) сердечник не насыщен. При наличии подмагничивания постоянным током степень насыщения увеличивается, амплитуда изменения магнитного потока в крайних стержнях уменьшается, а следовательно, уменьшается действующее значение U_p напряжения на рабочих обмотках. При неизменном действующем значении U напряжения сети переменного тока это должно, очевидно, привести к увеличению тока в рабочей цепи. При соответствующих обмоточных данных мощность $P_y = I_y U_y$, подводимая к обмотке управления, оказывается значительно меньше изменения мощности, потребляемой в нагрузке $P = I^2 R_n$.

Одна из важнейших характеристик усилителя – коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \Delta P / \Delta P_y = (P - P_0) / P_y,$$

где P_0 – мощность, потребляемая в нагрузке при отсутствии подмагничивания.

Для определения зависимостей $P(P_y)$ и $K_p(P_y)$ нередко используется семейство вольтамперных характеристик $U_p = f(I, I_y)$. Если пренебречь активными потерями в рабочих обмотках и высшими гармониками, которые неизбежно возникают вследствие нелинейности цепи, то из векторной диаграммы для рабочей цепи следует

$$U^2 = U_p^2 + (IR_n)^2.$$

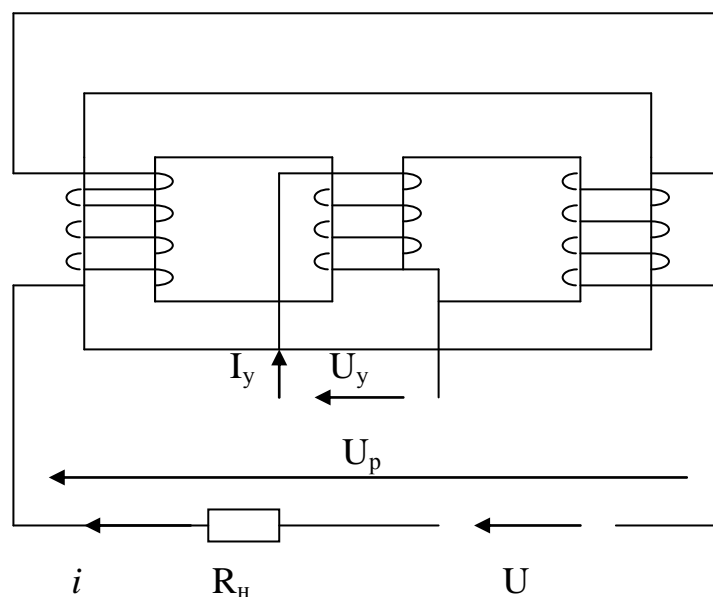


Рис. 16.1

Это уравнение окружности с центром в начале координат U_p , IR_n и радиусом U при одинаковом масштабе на обеих осях. Точки пересечения окружности с семейством характеристик $U_p = f(IR_n)$ при различных значениях I_y позволяют найти зависимость $I(I_y)$ при заданном значении U , а затем и зависимости $P(P_y)$ и $K_p(P_y)$.

Схема электрической цепи

В работе используется цепь, схема которой изображена на рис. 16.2.

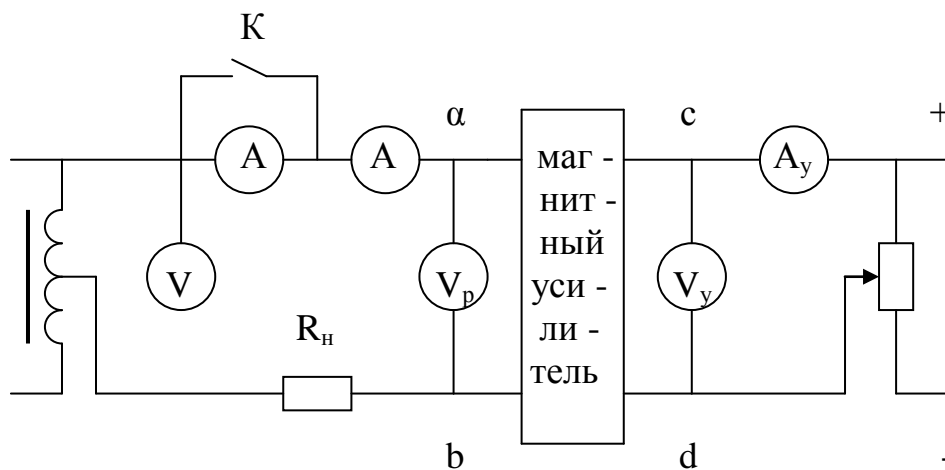


Рис. 16.2

Рабочие обмотки усилителя ab подключаются к цепи переменного тока, напряжение на входе которой можно регулировать с помощью автотрансформатора. Для более точного измерения тока в широких пределах

в этой цепи используется два амперметра, один из которых (с меньшим пределом измерения) при больших токах шунтируется ключом К. Сопротивление R_n – постоянное, перед сборкой схемы измеряется мостом.

Обмотка управления зажимами сд включается в цепь постоянного тока, напряжение на входе которой можно изменять с помощью делителя напряжения.

Измерительные приборы в цепи управления магнитоэлектрической, а в рабочей цепи – электродинамической системы.

Программа работы

1. Снять характеристики $U_p(I)$ при нескольких значениях управляющего тока (например, $I_y = 0, 20, 40, 60$ мА).

Результаты измерений (6-8 точек для каждой характеристики) внести в табл. 16.1.

Таблица 16.1

I_y	U_y	U	U_p	I	IR_n	Приме - чание
мА	В	В	В	А	В	
0						$R_n = \text{Ом}$
20						
40						
60						

2. По данным п. 1 вычислить IR_n (результаты также внести в табл. 16.1) и построить семейство характеристик $U_p = f(IR_n)$, выбрав одинаковые масштабы на координатных осях.

3. По кривым $U_p = f(IR_n)$ для напряжения U, заданного преподавателем, найти зависимость $I(I_y)$.

Результаты внести в табл. 16.2.

Таблица 16.2

I	A	0	20	40	60	Приме- чание
I_y	мА					U = В

4. При том же самом значении U снять зависимость $I(I_y)$ экспериментально (8÷10 точек).

Результаты измерений внести в табл. 16.3.

5. По расчетным и экспериментальным данным построить зависимости $I(I_y)$.

6. По результатам эксперимента с $U = \text{const}$ определить зависимости $P(P_y)$, $K_p(P_y)$.

Результаты также внести в табл. 16.3.

7. По данным пункта 6 построить зависимости $P(P_y)$, $K_p(P_y)$.

Таблица 16.3

I_y	U_y	I	$P_y = U_y I_y$	$P = I^2 R_n$	K_p
мА	В	А	Вт	Вт	-

Вопросы

1. Как (согласно или встречно) включены рабочие обмотки магнитного усилителя? Объяснить необходимость такого включения.

2. Почему в кривой тока нагрузки отсутствуют четные гармоники?

Литература

1. Л. 2, § 3-14.

2. Л. 3, § 24-8.

Лабораторная работа № 17

Исследование магнитомодуляционного преобразователя постоянных токов

Цель работы. Экспериментальное исследование нелинейной электрической цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником с модулированным сопротивлением.

Пояснения к работе

Используемое в работе устройство осуществляет бесконтактное преобразование постоянного тока за счет модуляции магнитного сопротивления стали в переменный магнитный поток, а последнего – в переменную Э. д. с.

Устройство (рис. 17.1) включает замкнутый шихтованный магнитопровод 1 со сквозными отверстиями, через которые намотана модуляционная обмотка 2. Поверх модуляционной обмотки равномерно расположена между сквозными отверстиями измерительная обмотка 3. К выходу измерительной обмотки подключен электронный вольтметр V . Модуляционная обмотка питается от сети переменного тока через автотрансформатор AT . Величина тока устанавливается с помощью автотрансформатора, реостата R и амперметра A_2 . На замкнутом магнитопроводе расположена также измерительная обмотка 4, питаемая от источника постоянного тока через амперметр A_1 . Выключатели K_1 и K_2 служат для отключения питающих токов в соответствующих цепях.

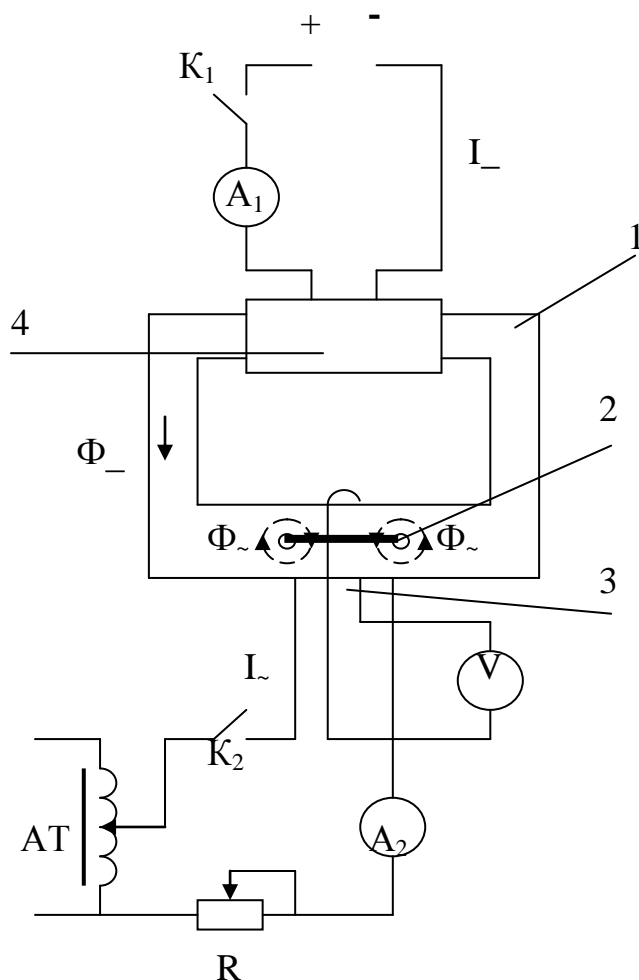


Рис. 17.1

Для преобразования постоянных токов в обмотку 4 устройства подают постоянный ток $I_~$. За счет модуляционных ампервитков замкнутый магнитопровод находится в насыщенном состоянии в течение каждого полупериода питающего напряжения. При этом проницаемость магнитопровода для продольного поля, созданного преобразуемым током, 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

индуктироваться э. д. с. удвоенной частоты, пропорциональная преобразуемому току:

$$e = - w_{\text{и}}(d\Phi / dt) = - w_{\text{и}}B_0S(d\mu / dt),$$

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

Φ – рабочий магнитный поток;

S – площадь поперечного сечения магнитопровода;

μ – нормальная относительная магнитная проницаемость магнитопровода, равная

$$\mu = B / \mu_0 H_{\text{и}}.$$

Учитывая, что

$$B_0 = \mu_0 H_{\text{и}},$$

где в свою очередь $H_{\text{и}}$ – напряженность магнитного поля, созданного преобразуемым током I перепишем в виде

$$e = - \mu_0 w_{\text{и}} S (I / l_{\text{ср}}) \cdot (d\mu / dt).$$

Здесь $l_{\text{ср}}$ – средняя длина пути рабочего магнитного потока по магнитопроводу.

Программа работы

1. Собрать схему для исследования магнитомодуляционного преобразователя постоянных токов.
2. Снять характеристику $E_{\text{и}}(I)$ при $I = \text{const.}$ (табл. 17.1).
3. Снять при помощи осциллографа кривую э. д. с. на выходе магнитомодуляционного преобразователя.

Таблица 17.1

I	A										
E	мВ										

Вопросы

1. Как располагается модуляционная обмотка на магнитомодуляционном преобразователе постоянных токов?
2. Почему при наличии тока в обмотке модуляции и отсутствии постоянного тока в измерительной обмотке сигнал на выходе модуляционной обмотки отсутствует?

3. Как происходит преобразование постоянного тока в переменную э. д. с. в магнитомодуляционном преобразователе постоянных токов?

Литература

1. Л. 8, § 1.2.
2. Л. 9, § 2.1.
3. Л. 10, § 3.5.

Лабораторная работа № 18

Исследование электромагнитного удвоителя частоты

Цель работы. Экспериментальное исследование нелинейной электрической цепи, содержащей трансформаторы с ферромагнитным сердечником, дающие возможность статического преобразования частоты.

Пояснение к работе

В симметричных многофазных системах гармоники, порядок которых равен или кратен числу фаз m , образуют симметричную систему нулевой последовательности. Остальные гармоники образуют симметричные системы прямой или обратной последовательности. Если взять m одинаковых катушек с ферромагнитными сердечниками и соединить их обмотки в звезду без нейтрального провода, то при питании этих обмоток от источника синусоидального симметричного m -фазного напряжения прямой последовательности вследствие нелинейности характеристик катушек в кривых тока появятся высшие гармоники. Однако гармоник, порядок которых равен или кратен m , в кривых тока не может быть, так как они, образуя систему нулевой последовательности, могут замыкаться только по нейтральному проводу, который в данном случае отсутствует. В таком случае эти гармоники появляются в кривых магнитного потока сердечников и соответственно в кривых фазовых напряжений на обмотках сердечников. Исходное условие отсутствия таких гармоник в линейном напряжении удовлетворяется, так как линейное напряжение равно разности фазовых. Если теперь наложить на все сердечники одинаковые вторичные обмотки, соединить их последовательно, то э. д. с. гармоник, порядок которых равен или кратен m , сложатся арифметически, основные же гармоники э. д. с. во вторичных обмотках в сумме дадут нуль. Таким образом, на вторичных зажимах частота напряжения будет в m раз превышать частоту напряжения

первичной цепи, т.е. получаем умножение частоты в m раз. На этом основаны удвоители частоты.

Схема электрической цепи

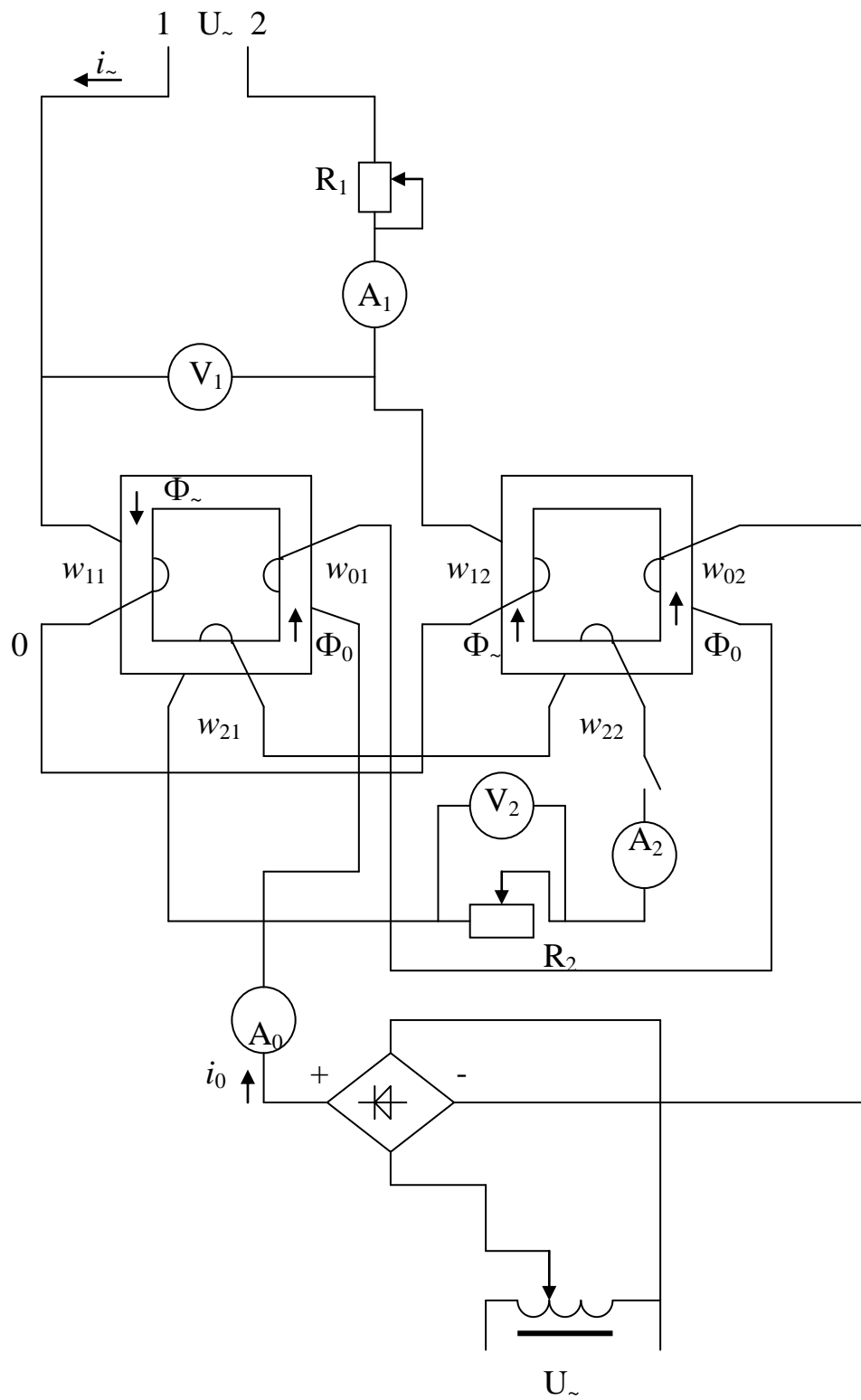


Рис. 18.1

Электромагнитный усилитель состоит из двух одинаковых О – образных шихтованных магнитопроводов с расположенными на них первичной (w_1),

вторичной (w_2) и подмагничивающей (w_0) обмотками. Обмотки w_{11} и w_{12} соединены последовательно и встречно и подключены к источнику переменного тока. Обмотки w_{01} и w_{02} соединены последовательно и согласно и подключены к источнику постоянного тока. Обмотки w_{21} и w_{22} соединены аналогично обмоткам w_{01} и w_{02} .

Для удвоителя частоты питание первичной цепи осуществляется от источника синусоидального однофазного напряжения U_{\sim} . Два напряжения U_{01} и U_{02} между нейтральной точкой О и зажимами 1 и 2 образуют симметричную двухфазную систему со сдвигом фаз π . Согласно вышеизложенному в соединенных последовательно вторичных обмотках w_2 могут быть выделены гармоники. Однако при симметрии кривой намагничивания четных гармоник быть не может. Для создания несимметрии в кривой намагничивания существует третья обмотка с постоянным подмагничивающим током i_0 .

Программа работы

1. Собрать схему электромагнитного удвоителя частоты (рис. 18.1).
2. Снять внешнюю характеристику удвоителя $U_2(I_2)$ при $I_0=\text{const}$, $I_1=\text{const}$.
3. Снять при помощи осциллографа кривые:
 - а) напряжения U и тока I в первичной цепи удвоителя;
 - б) э. д. с. e_{11} , e_{12} и e_{21} , e_{22} , индуктивных в обмотках удвоителя w_1 и w_2 ;
 - в) э. д. с. $e_1 = e_{11} - e_{12}$ и $e_2 = e_{21} + e_{22}$, индуктируемых в первичной и вторичной цепях удвоителя w_1 и w_2 .
4. Построить теоретически кривые и э. д. с. $e_1 = e_{11} - e_{12}$ и $e_2 = e_{21} + e_{22}$, индуктируемых в первичной и вторичной цепях удвоителя.

Таблица 18.1

I_2	А										
U_2	В										

Вопросы

1. Как должны соединяться обмотки переменного тока в электромагнитном удвоителе частоты?
2. Как должны соединяться выходные обмотки в электромагнитном удвоителе частоты?
3. Как происходит удвоение частоты в электромагнитном удвоителе частоты?

Литература

1. Л. 2, § 3-17.

Л и т е р а т у р а

1. Л. Р. Нейман и К. С. Демирчян. Теоретические основы электротехники, т. 1. – 3 – е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. ЛО, 1981.
2. Л. Р. Нейман и К. С. Демирчян. Теоретические основы электротехники, т. 2. – 3 – е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. ЛО, 1981.
3. Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. Основы теории цепей. – М.: ГЭИ, 1963.
4. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1984.
5. В. П. Попов. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1985.
6. П. Н. Матханов. Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи. – М.: Высшая школа, 1981.
7. И. Н. Добротворский. Лабораторный практикум по основам теории цепей. – М.: Высшая школа, 1986.
8. А. М. Плахтиев. Измерительные преобразователи с распределенными параметрами. – Ташкент: Фан, 1987.
9. Г. И. Разин, А. П. Щелкин. Бесконтактное измерение электрических токов. – М.: Атомиздат, 1971.
10. Ю. А. Андреев, Г. В. Абрамзон. Преобразователи тока для измерений без разрыва цепи. – ЛО, 1979.
11. Ю. В. Афанасьев. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969.
12. Лабораторные работы по электротехнике. Под ред. В. С. Пантюшина. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1977.

О г л а в л е н и е

I. Общие рекомендации по проведению лабораторного эксперимента	3
II. Рекомендации по электрическим измерениям в лабораторном практикуме	9
III. Техника безопасности при работе с электрическими установками.	16
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Исследование линейной разветвленной цепи постоянного тока	17
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Исследование активного двухполюсника	20
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Передача энергии постоянным током .	23
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Простая цепь однофазного переменного тока	26
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Исследование цепи, содержащей индуктивно связанные катушки	28
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Исследование резонанса при последовательном соединении (резонанс напряжений)	32
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Исследование резонанса при параллельном соединении (резонанс токов)	36
<i>Лабораторная работа № 8.</i> Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой	39
<i>Лабораторная работа № 9.</i> Исследование цепи трехфазного тока, соединенной треугольником	43
<i>Лабораторная работа № 10.</i> Исследование пассивного четырехполюсника	46
<i>Лабораторная работа № 11.</i> Исследование цепной схемы	49
<i>Лабораторная работа № 12.</i> Электрические цепи, содержащие источник несинусоидального напряжения	56
<i>Лабораторная работа № 13.</i> Исследование переходных процессов при подключении цепи к источнику постоянного напряжения	59
<i>Лабораторная работа № 14.</i> Исследование нелинейного резонанса при последовательном соединении (феррорезонанс напряжений)	62
<i>Лабораторная работа № 15.</i> Исследование нелинейного резонанса при параллельном соединении (феррорезонанс токов)	67
<i>Лабораторная работа № 16.</i> Исследование магнитного усилителя .	71
<i>Лабораторная работа № 17.</i> Исследование магнитомодуляционного преобразователя постоянных токов	74
<i>Лабораторная работа № 18.</i> Исследование электромагнитного удвоителя частоты	77
Литература	80

Подписано в печать .03.2007г.
Формат А5. Условных печатных листов 7.
Тираж 100. Заказ №
Отпечатано в типографии ТГАИ
Ташкент,