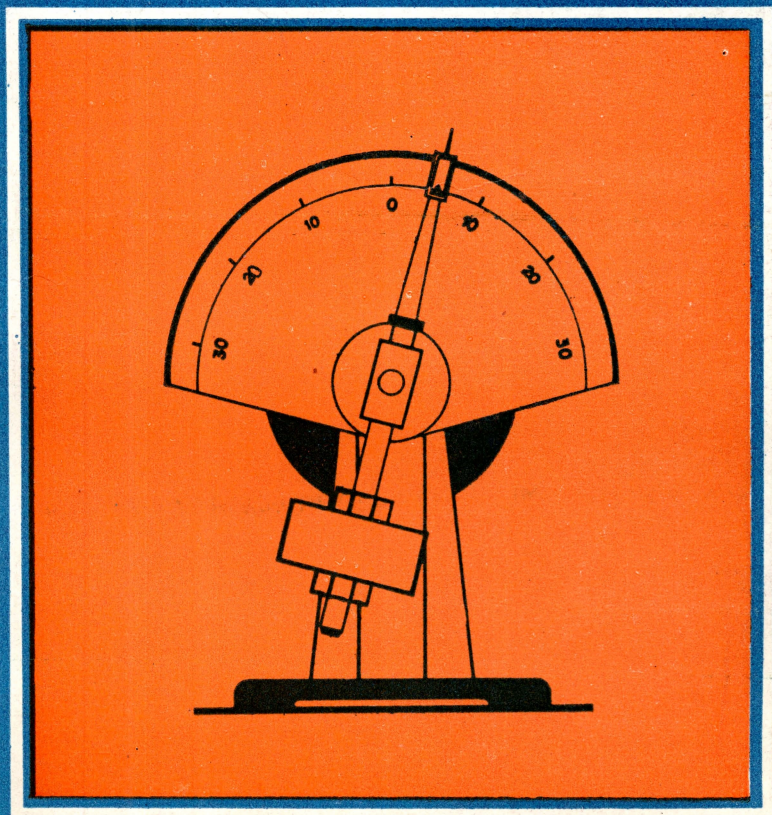


# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ



# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

---

Под редакцией  
заслуженного деятеля науки и техники РСФСР  
проф. В. С. ПАНТЮШИНА

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей вузов



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1977

6П2.1  
Л12  
УДК 621.3 (0.75)

М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, Х. Э. Зайдель, А. А. Кривов, Д. Н. Морозов, Ю. А. Мощинский, О. В. Николаева, В. С. Пантюшин, Ю. Х. Пухляков, И. К. Семенова, В. Б. Соколов, М. С. Цепляева, Г. И. Шарохин, В. Л. Шатуновский, А. Я. Шихин, Я. А. Шнейберг

Рецензенты:

Кафедра общей электротехники Уральского политехнического института им. С. М. Кирова (зав. кафедрой докт. техн. наук, проф. М. Г. Резин)  
Докт. техн. наук, проф. А. В. Нетушил (Московский институт тонкой химической технологии)

### Лабораторные работы по электротехнике

Под редакцией проф. В. С. Пантюшина

Редактор Т. И. Артемова. Художник Г. Г. Саленков.  
Художественный редактор Т. М. Скворцова. Технический редактор Т. Д. Гарина.  
Корректор В. В. Кожуткина

ИБ № 722

Сдано в набор 27/1—77 г. Подп. к печати 16/IV—77 г. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. тип. № 2.  
Объем 9,5 печ. л. 9,5 усл. п. л. 9,87 уч.-изд. л. Изд. № Эр—224. Тираж 70 000 экз. Зак. № 101.  
Цена 28 коп.

План выпуска литературы издательства  
«Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1977 г. Позиция № 114  
Издательство «Высшая школа»,  
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
154014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

Л12 Лабораторные работы по электротехнике. Под ред. В. С. Пантюшина. Учеб. пособие для вузов. М., «Выш. школа», 1977.

152 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, Х. Э. Зайдель [и др.].

В книге приведены общие рекомендации и программы подготовки и осуществления экспериментальных исследований электротехнических устройств и учаемых студентами неэлектротехнических специальностей в курсе «Электротехника».

Материал изложен в соответствии с методикой проведения лабораторных занятий, принятой в МЭИ.

Предназначен в качестве учебного пособия для студентов теплотехнических, машиностроительных и металлургических специальностей высших учебных заведений.

Может быть полезна для преподавателей, занимающихся разработкой учебных пособий к занятиям студентов неэлектротехнических специальностей в электротехнических лабораториях.

Л  $\frac{30306-325}{001(01)-77}$  114—77

6П2.1

© Издательство «Высшая школа». 1977.

## Предисловие

Предлагаемое пособие составлено преподавателями кафедры общей электротехники Московского энергетического института. Оно предназначено для студентов неэлектротехнических специальностей вузов, изучающих курс «Электротехника» по ранее изданным учебным пособиям «Электротехника» («Высшая школа», 1976) и «Сборник задач по общей электротехнике» («Высшая школа», 1973) коллектива авторов той же кафедры.

В отличие от многих других пособий к лабораторным занятиям в этой книге отсутствуют готовые схемы соединений электрических устройств с приборами или готовые таблицы для записи показаний приборов; нет в ней и предписаний о последовательности действий студентов с указаниями о том, на какой прибор и когда нужно посмотреть или за ручку какого аппарата взяться; исключены также теоретические сведения, заимствованные из учебного пособия, или расчетные формулы к примерам, рассмотренным в задачнике.

Авторы считают, что все это студенты могут проделать или отыскать самостоятельно, руководствуясь рабочим заданием к лабораторному занятию и учебной литературой, указанной в программе курса в качестве основной.

Важно, чтобы еще до прихода в лабораторию каждый участник занятия получил представление о сущности процессов, происходящих в объектах исследования, и экспериментальных методах их анализа. Тогда он сможет осмысленно и целеустремленно участвовать в поиске экспериментального решения поставленных задач.

В соответствии с такой установкой и было подготовлено предлагаемое учебное пособие. В нем содержатся общие рекомендации и конкретные задания по осуществлению экспериментальных исследований электротехнических устройств с учетом требований техники электробезопасности; приведены программы самостоятельной предварительной подготовки к выполнению рабочих заданий, предусматривающие обязательное обращение к учебнику и задачнику; даны технические характеристики объектов исследований и средств измерений, предоставляемых в распоряжение участников занятий.

При разработке тематики лабораторных занятий составители пособия стремились поставить такие задачи, которые служили бы иллюстрациями практических применений электротехнических устройств контроля, регулирования и исследования инженерно-физических систем неэлектромагнитной природы. Одновременно с этим рабочие задания составлены с учетом возможности их выполнения на универсальных



лабораторных стендах, обеспечивающих фронтальное (со всеми бригадами студентов одновременно) или полуфронтальное проведение лабораторных занятий по каждой теме.

В разработке некоторых заданий принимали участие В. А. Артемьев, В. П. Данильченко, В. В. Коген-Далин, В. В. Крымов, Э. Л. Соловкин, В. Г. Хлебников, которым авторы приносят свою благодарность.

Терминологическая обработка рукописи выполнена доц. М. Ю. Анвельтом.

Авторы выражают благодарность рецензентам докт. техн. наук, проф. А. В. Нетушилу и коллективу преподавателей кафедры общей электротехники Уральского политехнического института (зав. кафедрой докт. техн. наук, проф. М. Г. Резин), а также канд. техн. наук, доц. Г. Г. Рекусу за ряд ценных замечаний, которые были учтены при окончательной доработке рукописи.

Составители сборника будут признательны читателям, которые пришлют свои пожелания и критические замечания на книгу по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

*Авторы*

## **Введение**

### **I. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Курс электротехники — учебной дисциплины о технических приложениях электрических и магнитных явлений — по своему существу требует полного сочетания теории и лабораторной практики. Для того чтобы хорошо знать электротехнику, необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные электротехнические задачи, решение которых может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методом. Экспериментальные методы решения изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия по электротехнике имеют целью:

- 1) дать возможность подробно ознакомиться с устройством и характеристиками наиболее важных электротехнических приборов, аппаратов и машин, составляющих предмет лабораторной практики;
- 2) помочь овладеть практическими способами настройки и управления электротехнических устройств на заданный режим;
- 3) научить технике проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электротехнических устройств;
- 4) выработать умение выносить суждение о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных электротехнических устройств для решения тех или иных практических задач.

#### **ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОМУ ЗАНЯТИЮ**

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой из них.

В первую очередь экспериментатор должен твердо уяснить цель задания и отчетливо представлять назначение устройства и его условное обозначение на схемах, а также принцип действия и характеристики.

Такие сведения отсутствуют в данном пособии к лабораторным занятиям, так как содержатся в рекомендуемой для предварительного изучения учебной литературе или были сообщены на лекциях.

Затем по материалам руководства необходимо ознакомиться с основными параметрами объекта исследования и источников питания,

а также с техническими характеристиками имеющихся на стенде промежуточных преобразователей, нагрузочных устройств и пуско-регулирующих аппаратов. Эти сведения нужны для определения диапазона возможного изменения величин и необходимого режима работы объекта исследования и вспомогательных устройств. Требуемые расчетные соотношения и формулы следует найти и записать самостоятельно на основе изучения учебного пособия и задачника.

Особое внимание следует уделить измерительным приборам, комплектам мер, измерительным преобразователям и измерительным установкам, предоставляемым для решения лабораторной задачи.

Место и способы включения в цепи объекта исследования вольтметров, амперметров и ваттметров должны быть определены экспериментатором самостоятельно на основе изучения учебного пособия и задачника.

Еще до начала исследования рекомендуется составить таблицу цен делений многопредельных приборов или ваттметров, используемых в работе.

Информация о способах включения и использования осциллографа, генератора звуковой частоты и всех нестандартных устройств для измерения неэлектрических величин приведена в руководстве.

В соответствии с каждым этапом рабочего задания необходимо составить схемы соединения электрических цепей, состоящих из элементов объекта исследования и электроизмерительных средств. Непосредственно на этих схемах около символов приборов желательно указать конечные значения шкал или рабочий предел измерений, а около символа меры — номинальное значение меры.

Одновременно с составлением схемы соединения элементов электрических цепей объекта исследования и средств измерений рекомендуется заготовить таблицы для записи показаний приборов. При измерениях с помощью многопредельных приборов, гальванометров и ваттметров предусмотреть две графы: одну для показаний по шкале, а вторую — для измеренных величин, подсчитанных исходя из цен делений шкал.

Составленные схемы предъявляют руководителю занятий для проверки и получения разрешения приступить к выполнению задания.

Одним из важных этапов подготовки к выполнению лабораторного задания является составление плана проведения эксперимента с указанием требуемых операций и их последовательности. Руководством к его составлению могут служить методические рекомендации к выполнению рабочего задания, содержащиеся в данном пособии.

Завершает этап подготовки составление письменных ответов на контрольные вопросы, приведенные совместно с рабочим заданием.

## **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, зна-

чительно 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.

Для узловых соединений нескольких ветвей удобно воспользоваться вспомогательными колодками, имеющимися на переносных панелях, устанавливаемых на столах стендов.

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. Маркирующие бирки укрепляют на стенде с помощью особых текстолитовых держателей, имеющихся на приборных щитах стендов.

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

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

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

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

После предварительного опробования цепи, проверки или оценки диапазона изменения переменного параметра необходимо наметить



последовательность отдельных манипуляций и отсчетов, а затем приступить к наблюдениям.

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

Результаты всех первичных наблюдений и отсчетов записывают в таблицу протокола испытаний. Запись отсчетов должна вестись в точном соответствии с показаниями измерительных приборов, без всяких пересчетов в уме, хотя бы и 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 наблюдениях или в 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 приступать только после проверки и визирования протокола преподавателем.

### **ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

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

В отчете на титульном листе указываются названия института, кафедры и лаборатории, номер и наименование работы, фамилия и инициалы студента, выполнившего работу, номер его академической группы.

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. В.1:

Т а б л и ц а В.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 сопровождена 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 электротехнике во всех работах обработку результатов эксперимента можно вести с помощью логарифмической линейки, т. е. с точностью до трех значащих цифр. Измеренные и вычисленные величины заносят в одну таблицу, составленную по прилагаемой форме:

Таблица В.2

Измеренные величины						Расчетные величины			
$I_1$	$V_1$	$I_2$		$P$		$\cos \varphi$	$z$	$C$	$L$
А	В	дел	А	дел	Вт	—	Ом	мкФ	мГ

Вычерчивание 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  $100 \times 100$  мм, желательно на миллиметровой бумаге; по осям приводят стандартные условные буквенные обозначения величин и единиц их измерения, указывают деления с одинаковыми интервалами, соответствующие откладываемым величинам в принятых единицах измерения или в десятичных кратных либо дольных единицах.

Числовые отметки у масштабных делений принято выбирать такими, чтобы они составляли  $10^{\pm n}$ ,  $2 \times 10^{\pm n}$  или  $5 \times 10^{\pm n}$  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, каж-

дую 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. Составление подобных отчетов — первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

## **II. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ**

### **ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ, ИСПОЛЗУЕМЫЕ 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 значе-

ние 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; узкопрофильный прибор типа АСК — амперметр и вольтметр; электроннолучевой осциллограф и генератор сигналов.

### **Измерители тока**

*Для измерения постоянного тока* на стенде представлены: магнитоэлектрические миллиамперметры обычного исполнения (тип М366), ГОСТ 8711—60, многопредельные, с пределами измерений 3; 150; 750 мА, класс точности 1,0 и узкопрофильный миллиамперметр магнитоэлектрический, ГОСТ 15182—70, многопредельный, с пределами измерений 0,05; 0,1; 1; 5 мА.

*Для измерения переменного тока* на стенде имеются электромагнитные миллиамперметры (тип Э377), ГОСТ 8711—60, многопредельные, с пределами измерений 15; 30; 75; 150 мА и 300; 750; 1500 мА, класс точности 1,0.

### **Измерители напряжения**

*Для измерения постоянного напряжения* предназначены магнитоэлектрические вольтметры (тип М366), многопредельные, с пределами измерений 1,5; 3; 7,5; 15; 75, класс точности 1,0 и узкопрофильный вольтметр магнитоэлектрический с пределами измерений 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1 В.

*Для измерения переменного напряжения* на стенде представлены: электромагнитные вольтметры (тип Э377), многопредельные, с пределами измерений 75; 150 В и 7,5; 15 В и цифровой вольтметр (тип Ф 220/1) с пределами измерений 1; 10 В, класс точности 1,0/0,5.

Цифровой вольтметр (ГОСТ 13607—68) представляет собой измеритель, выходная величина которого выдается в числовом, дискретном виде в отличие от аналогового (стрелочного) вольтметра, где отсчет производится по отклонению стрелки, являющемуся непрерывной функцией изменений измеряемого напряжения.

Работа цифрового вольтметра основана на принципе сравнения измеряемого сигнала с сигналом, вырабатываемым внутри прибора, т. е. на компенсационном принципе, что обеспечивает достаточно высокий класс точности. Однако следует отметить, что схема цифрового вольтметра рассматриваемого типа обеспечивает правильность измерений напряжений только строго синусоидальной формы ввиду того, что измеритель реагирует на среднее значение измеряемого напряжения, а шкала проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения.

Установка требуемого предела измерений во всех перечисленных приборах осуществляется с помощью клавишных переключателей.



## Измеритель мощности

Для измерений активной мощности в цепях переменного тока на стенде представлен электродинамический ваттметр (тип Д539), ГОСТ 8476—60, класс точности 0,5, с пределами измерений по току 0,5; 1 А и по напряжению 30; 75; 150; 300 В. Номинальный ток параллельной цепи прибора 3 мА, внутреннее активное сопротивление последовательной цепи прибора 0,068 и 0,034 Ом.

Предел измерения по току обеспечивается соответствующим включением токовой цепи прибора, а предел измерения по напряжению устанавливается с помощью рычажного переключателя на корпусе прибора.

Цена деления ваттметра вычисляется по формуле

$$C_W = \frac{U_n I_n}{\alpha_{\max}} [\text{Вт/дел}],$$

где  $U_n$ ,  $I_n$  — установленные пределы измерения по напряжению и по току;  $\alpha_{\max}$  — полное число делений шкалы.

При измерениях активной мощности в однофазных и трехфазных цепях следует обращать внимание на правильное включение зажимов обмоток ваттметра. Зажимы, помеченные звездочками (\*), называются генераторными. При измерениях активной мощности генераторные зажимы последовательной (\*I) и параллельной (\*U) обмоток должны включаться в один узел. Ввиду того что активная мощность приемника — всегда величина положительная, то в однофазной цепи это включение всегда обеспечивает правильное отклонение стрелки прибора вправо.

В трехфазной трехпроводной цепи при измерении активной мощности по методу двух ваттметров показание одного из ваттметров может оказаться отрицательным, при этом стрелка отклонится влево до упора. Для отсчета показаний в этом случае необходимо воспользоваться переключателем направления тока в параллельной обмотке прибора (совмещенным с переключателем пределов измерения) и переключить его с «+» на «—». Показание стрелки, которая при этом отклонится вправо, следует записать со знаком «минус». Активную мощность трехфазного приемника вычисляют как алгебраическую сумму показаний двух ваттметров [1, гл. 16].

## Измеритель мгновенных значений периодических напряжений

Для наблюдения и регистрации изменяющихся во времени периодических напряжений на стенде представлен электроннолучевой осциллограф.

### 1. Основные паспортные данные осциллографа

Представленный на стенде электроннолучевой осциллограф (тип С1-68) предназначен для исследования напряжений в диапазоне 2 мВ—350 В с частотами от 0,06 Гц до 1 МГц. Входное сопротивление при-

бора равно 1 МОм, рабочая часть экрана составляет 60 мм по вертикали и 80 мм по горизонтали (ГОСТ 9810—69).

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Осциллограф С1-68 является сложным электронным устройством, благодаря применению полупроводниковых приборов он имеет небольшие габариты (513 × 276 × 450) мм и малое потребление энергии (40 В·А). Класс точности устанавливается ГОСТ 98—69. На рис. В.1 показана лицевая панель прибора. Работа осциллографа осно-

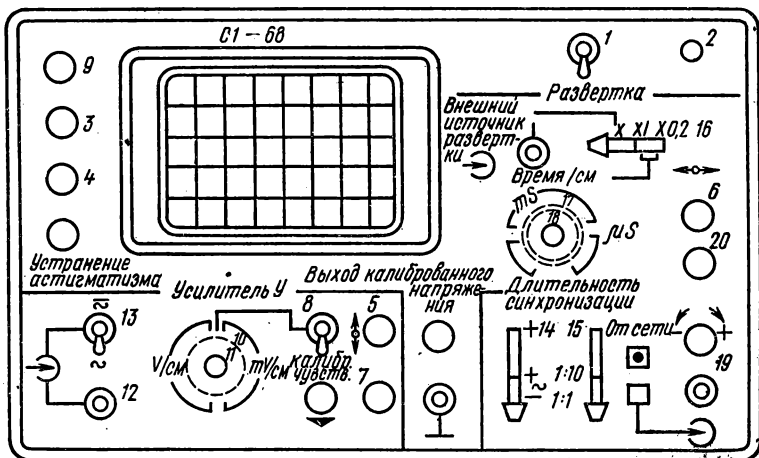


Рис. В.1

вана на отклонении электронного луча электрическим полем. Основные контрольные органы осциллографа сгруппированы на лицевой панели, их функции четко обозначены надписями и условными значками. Ниже дано описание назначения каждой из ручек и рекомендации по управлению ими.

## 2. Управление осциллографом

Для включения осциллографа в сеть нужно соединить прибор соответствующим шнуром с источником питания и включить тумблер 1 («Сеть»), расположенный в правом верхнем углу панели; тогда загорится сигнальная лампочка 2, находящаяся рядом. Слева от экрана расположены ручки регулировки яркости 3 и фокусировки 4 изображения электронного луча. Их регулируют до тех пор, пока на экране не будет установлена яркая тонкая горизонтальная линия.

Ручками 5 (↕, под экраном в середине прибора) и 6 (↔, справа в верхней части прибора) обеспечивают перемещение изображения на экране вверх и вниз или вправо и влево. Ручка 7 («Баланс», под ручкой 5) предназначена для сбалансирования усилителя вертикального отклонения луча: линия развертки не должна перемещаться при переключении тумблера 8 с «X 10» на «X 1». Ручка 9 (верхний левый

угол) служит для регулировки яркости подсвета делений на шкале экрана.

Ручки 8, 10, 11 (под экраном) осуществляют изменение амплитуды рассматриваемых на экране кривых, причем ручка 8 ( $\times 0$ ) служит для заглубления чувствительности усилителя, 10 — большая ручка переключателя «V/см, mV/см» — для выбора величины сигнала, удобного для наблюдения, а 11 — малая ручка переключателя «Усиление» — для плавного регулирования чувствительности усилителя.

Исследуемое напряжение подается на гнездо 12 (1M $\Omega$ 50pF), расположенное внизу слева, и на заземленную точку измерительной схемы.

Ручка переключателя входа 13 предназначена для выбора открытого или закрытого входа, в большинстве случаев ее устанавливают на «—» (открытый вход).

Ручки справа внизу обслуживают блок синхронизации: ручка 14 служит для переключения полярности синхронизации, а ручка 15 — для выбора источника синхронизации. Ее чаще ставят на внутреннюю синхронизацию (положение  $\square$ ).

Ручки 16, 17, 18, расположенные выше справа, предназначены для регулирования частоты развертывающего напряжения, причем ручка 16 служит для пятикратного растяжения развертки, а 17 — большая ручка, двоянного переключателя «Время/см» и 18 — малая ручка «Длительность» позволяют плавно изменять размеры изображения по горизонтальной оси, т. е. изменять масштаб времени для рассматриваемых кривых.

Ручка 20 («Стабильность») позволяет сделать выбор режима работы генератора развертки (ждущий или автоколебательный). Ручка 19 определяет точку запуска развертки и служит для получения устойчивого изображения сигнала.

Ручки, употребляемые в специальных случаях работы с осциллографом (калибровка, подключение внешних источников дополнительных сигналов и др.), не помечены цифрами, ими не следует пользоваться.

Калибровка осциллографа с помощью калибровочного сигнала не рассматривается.

### 3. Исследование кривой напряжения

#### Подготовка к измерениям

Перед началом работы все ручки на лицевой панели осциллографа должны быть поставлены в следующие положения: 1 — вниз, 3, 4, 5, 6, 7, 19 — в среднее, 11, 18, 20 — в крайнее правое, 8 — в  $\times 10$ , 14 — в «+», 15 — в  $\square$ , 10 — в 2 мВ/см, 9 — в крайнее левое, 13 — в «—», 16 — в  $\times 1$ , 17 — в 0,5 мс.

Далее следует соединить прибор с источником питания и тумблером 1 включить его в сеть. При этом должна загореться сигнальная лампочка. Через 2 ÷ 3 мин нужно отрегулировать яркость и фокус луча и переместить его в рабочую часть шкалы, через 15 мин прогре-

ва — сбалансировать усилитель вертикального отклонения луча (ручка 7).

Принимая, что калибровка коэффициента отклонения и длительности развертки произведены предварительно, можно считать прибор подготовленным к работе.

## Измерения

К гнезду 12 нужно подключить исследуемое напряжение и регулированием ручек 8, 10, 11, а также 17, 18, 19, 20 установить устойчивое, удобное для наблюдения изображение на экране.

Для определения масштабов по осям надо воспользоваться данными калибровки. Масштаб по оси ординат в В/мм можно определить с помощью электродинамического или электромагнитного прибора, пользуясь формулой  $m_v = \frac{2 A \sqrt{2}}{a}$ , где  $A$  — показание прибора,

$B$ ;  $a$  — отклонение луча от пика до пика (двойная амплитуда) (мм).

Следует принять во внимание, что значение коэффициента отклонения усилителя вертикального отклонения, обозначенное «В/см, мВ/см», верно лишь при крайнем правом положении ручки 11, а значения длительности развертки, обозначенные на панели, верны лишь при крайнем правом положении ручки 18 (есть механическая фиксация).

## 4. Исследование кривой тока

Для исследования кривой тока в цепь последовательно с объектом исследования надо включить образцовый резистор малого сопротивления и измерять напряжение, снимаемое с зажимов резистора, так, как описано в п. 3. Деля полученные сигналы напряжения на значение сопротивления образцового резистора, определяем неискаженную кривую тока.

## Генератор сигналов

Для исследования частотных характеристик различных электротехнических схем и устройств на схеме представлен специальный источник питания в виде генератора синусоидальных электрических колебаний звуковых и ультразвуковых частот.

## Общее описание

Генератор сигналов низкочастотный (тип ГЗ-36) представляет собой портативный источник синусоидальных электрических колебаний звуковых и ультразвуковых частот (ГОСТ 9763—67 «Приборы электронные измерительные. Общие технические свойства», группа III). Внешний вид генератора сигналов показан на рис. В.2.

Генератор предназначен для выдачи синусоидального напряжения до 5 В в диапазоне частот от 20 до 200 000 Гц с погрешностью по частоте не более  $\pm(0,03 + 1,5)$  Гц. Питание прибора осуществляется



от сети 127 и 220 В частотой 50 Гц. Мощность, потребляемая генератором, не превышает 7 В·А.

В генераторе предусмотрена возможность плавной регулировки выходного напряжения. На выходе генератора, кроме того, имеется трехступенчатый делитель, обеспечивающий деление выходного напряжения в 10, 100 и 1000 раз.

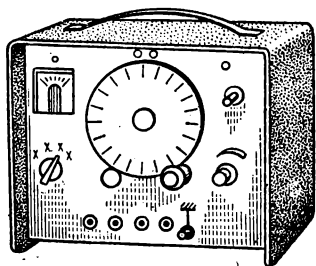


Рис. В.2

Напряжение на выходе генератора контролируется стрелочным индикатором выхода. Погрешность градуировки шкалы индикатора выхода не превышает  $\pm 6\%$  от верхнего предела измерения во всем диапазоне частот. Изменение выходного напряжения при изменении напряжения питания на  $\pm 10\%$  от номинального значения не должно превышать  $\pm 2\%$ . Генератор обеспечивает нормальную работу через 5 мин после включения и может непрерывно

работать в течение 8 ч. Среднее время безотказной работы генератора 1500 ч, габариты 260 × 230 × 165 мм.

### Органы управления

На рис. В.3 показана лицевая панель прибора с обозначением всех регулирующих органов: 1 — индикатор выхода, выпрямительный вольтметр для контроля и установки выходного напряжения; 2 — переключатель «Множитель» для установки одного из поддиапазонов частот: 1) от 20 до 200 Гц, положение  $\times 1$ ; 2) от 200 до 2000 Гц, положение  $\times 10$ ; 3) от 2000 до 20 000 Гц, положение  $\times 100$ ; 4) от 20 000 до 200 000 Гц, положение  $\times 1000$ ; 3 —

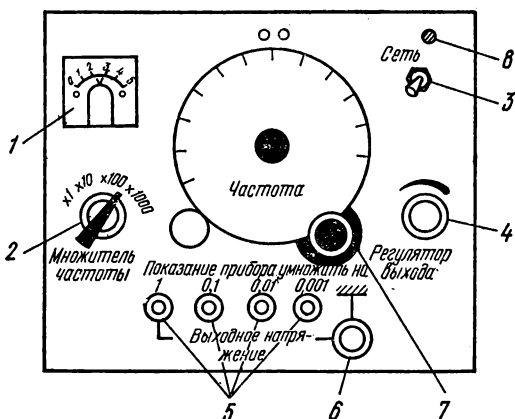


Рис. В.3

тумблер «Сеть» для включения генератора в сеть; 4 — ручка «Регулятор выхода» — потенциометр для плавного регулирования выходного напряжения; показание стрелочного вольтметра умножается на соответствующий коэффициент; 5 — зажимы для подключения приемника (нагрузки) к генератору; 6 — зажим заземления; 7 — ручка для плавной регулировки частоты в пределах поддиапазона; 8 — сигнальная лампочка.

## Подготовка прибора к работе

Подключить цепь, на вход которой требуется подать напряжение от генератора на зажимы 5 и 6. Вилку шнура питания включить в сеть. Включить тумблер 3, при этом должна загореться сигнальная лампочка. Поставить ручку 4 в крайнее левое положение и установить механический нуль индикатора. Переключателем 2 и ручкой 7 установить требуемую частоту. Ручкой 4 установить по шкале индикатора требуемое выходное напряжение.

По окончании работы выключить тумблер 3.

## 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 с 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 согласно ГОСТ 13600—68 следующими погрешностями:

абсолютной погрешностью

$$\Delta = \pm a,$$

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

приведенной погрешностью

$$\gamma = \pm \frac{100\Delta}{x_N} \%,$$

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

Величина  $x_N$  определяется видом шкалы прибора, как указано на рис. В.4.

Точность измерения оценивается относительной погрешностью

$$\delta = \pm \frac{100\Delta}{x} \%,$$

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

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

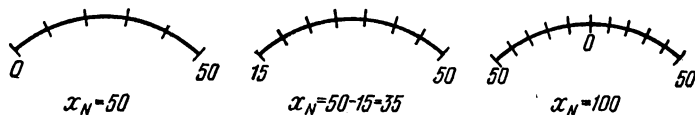


Рис. В.4

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

$$\gamma = K = \pm \frac{100\Delta}{x_N} \%, \quad \delta = \pm \frac{100\Delta}{x} \%,$$

можно определить относительную погрешность измерения:

$$\delta = \pm K \frac{x_N}{x}.$$

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.**

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

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

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

Результаты измерения:

первым амперметром —  $I_1 = 2,5 \pm 2,5 \cdot \frac{5}{100} = 2,5 \pm 0,125 \text{ A}$ , 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 —  $I_2 = 2,5 \pm 2,5 \cdot \frac{2}{100} = 2,5 \pm 0,05 \text{ A}$ , 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.

## О п е р а ц и я о к р у г л е н и я

1. Лишние значащие цифры у целых чисел заменяются нулями.

Получено  $L = (123357 \pm 678)$  мГ. Надо записать  $L = (123400 \pm 700)$  мГ.

2. Лишние значащие 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. Следует 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 часто в электротехнике встречаются следующие измерения:

### Н а п о с т о я н н о м т о к е

Измерение сопротивления методом амперметра — вольтметра.

Так как  $r = U/I$ , то погрешность измерения  $\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}$ ,

т. е. относительная погрешность измерения сопротивления равна сумме относительных погрешностей измерения напряжения  $\delta_U$  и тока  $\delta_I$ .

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

Определить измеренное сопротивление, пренебрегая влиянием внутренних сопротивлений приборов:

$$\delta_V = K_U \frac{U_N}{U} = 1,5 \cdot \frac{100}{80} = \frac{15}{8} = 1,875\%,$$

$$\delta_I = K_I \frac{I_N}{I} = 1 \cdot \frac{5}{4} = 1,25\%,$$

$$\delta_r = \delta_V + \delta_I = 3,125\%,$$

$$r = \frac{U}{I} \pm \delta_r = \frac{80}{4} \pm 3,125\% = 20 \pm 3,125 \cdot \frac{20}{100} \quad (20 \pm 0,625) \text{ Ом.}$$

О т в е т :  $r = (20,0 \pm 0,6)$  Ом.

### Н а п е р е м е н н о м т о к е

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



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

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

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

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

$$\delta_I = K_I \frac{I_N}{I} = 1 \cdot \frac{2,5}{1,5} = 1,67\%,$$

$$\delta_P = K_P \frac{P_N}{P} = 0,5 \cdot \frac{75}{50} = 0,75\%,$$

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

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

$$\text{О т в е т: } \cos \varphi = 0,67 \pm 0,03.$$

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  $\delta_z = \delta_U + \delta_I$ ,  $\delta_r = \delta_P + 2\delta_I$ ,  $\delta_x = \frac{1}{2} [2\delta_z + 2\delta_r] = \delta_U + \delta_P + 2\delta_I$ .

Используя данные предыдущего численного примера, получим:

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

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

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

$$z = \frac{U}{I} \pm \delta_z = \frac{50}{1,5} \pm 3,93\% = 33,2 \pm 33,2 \frac{3,93}{100} = (33,2 \pm 1,3) \text{ Ом},$$

$$r = \frac{P}{I^2} \pm \delta_r = \frac{50}{1,5^2} \pm 4,09\% = 22,2 \pm 22,2 \frac{4,09}{100} = (22,2 \pm 0,905),$$

$$r = (22,2 \pm 0,9) \text{ Ом},$$

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

$$x = (24,8 \pm 1,5) \text{ Ом}.$$

Приведенные примеры расчета предельной погрешности косвенных измерений показывают, что погрешности определяются по формулам, аналогичным формулам дифференциального исчисления (см. лабораторный практикум по физике, изд. МЭИ).

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 на стенде 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 вызвало 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 1 В номинального напряжения.

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  $A_1$  — показание ваттметра в фазе  $C$ ;  $A_2$  — показание ваттметра в фазе  $A$ .

Характер нагрузки симметричного приемника в этом случае можно определить из соотношения

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

### **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 неизолированными 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 системам 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 приступить к соединению устройств, расположенных на стенде, убедитесь, что контакты автоматов сетей разомкнуты, а указатели положения элементов регулирования лабораторных автотрансформаторов и источников питания расположены в позиции «Нуль».

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

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

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

6. При сборке цепей избегайте пересечения проводов и обеспечьте высокую плотность контактов всех разъёмных соединений. Неиспользованные 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. Остерегайтесь соприкосновения с вращающимися валами и соединительными муфтами электрических машин, а также с дисковыми роторами электромагнитных тормозов.

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

13. Прежде чем разбирать цепи или производить любые пересоединения в них, убедитесь, что контакты автоматов сети разомкнуты, источники питания отключены, а роторы электрических машин находятся в неподвижном состоянии.

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

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

## Работа № 1

### ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МАКЕТА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Уяснить необходимость применения компенсационного устройства для измерения э. д. с. малоомощного источника.

Ознакомиться с возможностью применения компенсационных измерительных устройств различных типов для измерения малых термо-э.д.с.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуется система, состоящая из макета нагревательной установки и компенсационного измерительного устройства постоянного напряжения (рис. 1.1), содержащего измерительный преобразователь

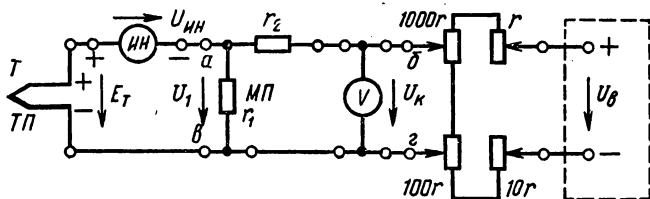


Рис. 1.1

неэлектрической величины в электрическую  $ТП$ , индикатор равновесия напряжения  $ИН$  с регулятором чувствительности, масштабный преобразователь  $МП$  с коэффициентом преобразования  $k = U_k/U_1 = (r_1 + r_2)/r_1$ , измеритель  $V$  компенсирующего напряжения  $U_k$ , регулятор постоянного напряжения  $r \div 1000 r$  и вспомогательный источник с постоянным напряжением  $U_b = \text{const}$ .

Для тех же целей измерения температуры применяется другое компенсационное измерительное устройство (рис. 1.2), отличающееся от указанного на рис. 1.1 тем, что измеритель  $V$  компенсирующего напряжения  $U_k$  с масштабным преобразователем  $МП$  заменен на измеритель  $mA$  компенсирующего тока  $I_k$  с электрическим преобразователем  $r_k$  в компенсирующее напряжение  $U_k = r_k I_k$ .

На рис. 1.3 изображен внешний вид лицевой стороны устанавливаемой на столе стенда переносной панели с условными символами деталей, используемых при выполнении рабочего задания. Применяются

также многопредельные магнитоэлектрические миллиамперметр  $mA$  и вольтметр  $V$ , магнитоэлектрический микроамперметр со световой стрелкой и источник питания с постоянным напряжением  $U_B = \text{const}$ , закрепленные на столе станда.

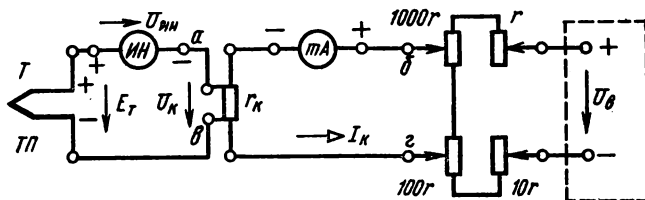


Рис. 1.2

В качестве макета нагревательной установки взят остеклованный керамический трубчатый резистор ПЭВР-50,  $1,5 \text{ кОм} \pm 10\%$ , внутренняя температура которого подлежит измерению. При повороте переключателя из положения «Выкл.» в положение «Вкл.» загорается лампочка, указывающая на включение резистора в сеть переменного тока.

Роль измерительного преобразователя неэлектрической величины в электрическую выполняет термопара ХК хромель — копель, помещенная внутри нагревающего трубчатого резистора. Как известно, термопара является преобразователем разности температур горячего и холодного спаев в постоянную термо-э. д. с. В приложении П 1.1 даны выписка из таблицы 5 ГОСТ 3044—61, (с. 26, 27), в которых приведена зависимость термо-э. д. с. от температуры рабочего конца термопары при температуре свободного конца  $0^\circ \text{C}$ , например, термо-э. д. с.  $E_T = 8,80 \text{ мВ}$ , соответствует температура  $t = 125^\circ \text{C}$ .

Индикатором равновесия напряжения  $ИН$  служит магнитоэлектрический микроамперметр со световой стрелкой на пределы измерения  $\pm 50 \text{ мкА}$ , с двусторонней шкалой и внутренним сопротивлением  $500 \text{ Ом}$ .

Обычно приборы, используемые в качестве индикаторов равновесия напряжения, снабжаются защитными добавочными резисторами, выполняющими роль загрузителей чувствительности приборов.

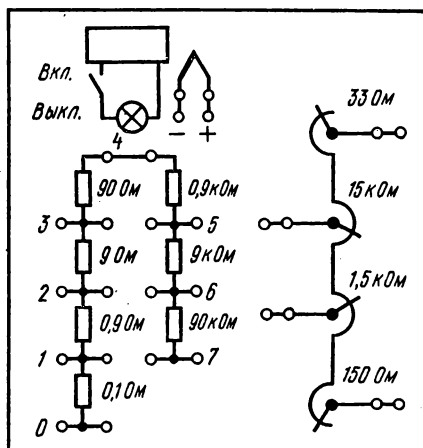


Рис. 1.3

В данной работе добавочным резисторам придана дополнительная измерительная функция. С этой целью в качестве добавочных применены образцовые резисторы, с помощью которых микроамперметр используется как многопредельный указатель напряжения с пределамиказания 25; 50; 100; 200; 500 мВ. Масштабным преобразователем в этом случае являются 7 последовательно соединенных образцовых резисторов, каждый с двумя парами гнезд. Сопротивления между гнездами с отметкой 0 и каждым последующим гнездом с числовыми отметками от 1 до 7 равны соответственно 0,1—1—10—100 Ом—1—10—100 кОм. Резисторы с такими значениями сопротивлений позволяют набирать делитель напряжения с различными значениями коэффициента деления  $k$ . Введем обозначения: через  $r_1 = 10^{n-2}$ , где  $n = 1 \div 6$ , обозначим значения сопротивлений между гнездами с отметками 0 и  $n$ ; через  $r_1 + r_2 = 10^{m-2}$ , где  $m = 2 \div 7$ , обозначим значения сопротивлений между гнездами с отметками 0 и  $m$ . Тогда коэффициент деления  $k = (r_1 + r_2)/r_1 = 10^{m-n} = 10 \div 10^6$ . Рассмотренные резисторы применяются в качестве делителя компенсирующего напряжения  $U_k/k = U_1$  с различным компенсирующим сопротивлением  $r_1$ .

Измерителем компенсирующего напряжения  $U_k$  служит магнитоэлектрический многопредельный вольтметр  $V$  с пределами измерения  $U_k = 1,5; 3; 7,5; 15; 75$  В.

Измерителем компенсирующего тока  $I_k$  является магнитоэлектрический многопредельный миллиамперметр  $mA$  с пределами измерения  $I_k = 3; 15; 75; 300; 750$  мА.

Преобразователем компенсирующего тока  $I_k$  в компенсирующее напряжение  $U_k$  могут быть образцовые резисторы с компенсирующим сопротивлением  $r_k = r_1$ .

В качестве регулятора постоянного напряжения следует применить четыре последовательно соединенных регулируемых резистора с номинальными значениями сопротивлений 33—150 Ом — 1,5—15 кОм. Гнезда подвижных контактов внешних резисторов с сопротивлениями  $r$  и  $10r$  необходимо соединить с зажимами источника постоянного напряжения  $U_b = \text{const}$ . Гнезда подвижных контактов внутренних резисторов с сопротивлениями  $100r$  и  $1000r$  должны быть соединены с вольтметром, измеряющим компенсирующее напряжение  $U_k$ . С помощью этих четырех резисторов с относительными сопротивлениями  $r$ ,  $10r$ ,  $100r$  и  $1000r$  возможно четырехступенчатое плавное регулирование компенсирующих напряжения  $U_k$  (рис. 1.1) и тока  $I_k$  (рис. 1.2). Такое тонкое регулирование компенсирующего напряжения особенно необходимо в процессе компенсации, когда к индикатору равновесия напряжения  $ИН$  подается разность весьма близких по значению напряжений.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Включить макет нагревательной установки в сеть переменного тока и через четверть часа к зажимам термпары подключить измеритель напряжения. Объяснить полученные результаты.

3.2. Руководствуясь схемой рис. 1.1, собрать элементы компенса-

ционного измерительного устройства постоянного напряжения с делителем компенсирующего напряжения и измерить им температуру макета нагревательной установки.

3.3. Руководствуясь схемой рис. 1.2, собрать элементы компенсационного измерительного устройства постоянного напряжения с электрическим преобразователем компенсирующего тока и повторить измерение температуры макета нагревательной установки. Сопоставить полученные результаты с результатами п. 3.2.

3.4. (*Факультативно*). Определить тепловую постоянную макета нагревательной установки, для чего измерить зависимость термо-э. д. с.  $E_T$  от времени  $t$  нагрева или охлаждения. Построить график  $E_T(t)$ .

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. По § 16.1 в [1], ГОСТ 13 600—68, ГОСТ 16 263—70 ознакомиться с методами и погрешностями измерения напряжений.

4.2. В [2] ознакомиться с решениями задач 9.13, 9.14, решить задачи 9.15; 9.16; 9.19 и прочитать § 16.2 в [1]. Уяснить погрешности измерения, вносимые измерителями напряжений, и обосновать необходимость применения метода сравнения при измерении напряжений маломощных источников.

4.3. Ознакомиться с материалами, помещенными в приложении П 1.2, и уяснить сущность и особенности метода сравнения напряжений.

4.4. Начертить схему соединения резисторов для преобразования неизменного по величине напряжения  $U_B = \text{const}$  на входе в четырехступенчатое, плавно регулируемое напряжение  $U_K = \text{var}$  на выходе и обосновать определенный порядок соединения этих резисторов со входом и выходом.

4.5. Начертить схему компенсационного измерителя напряжений и его два варианта для измерения малых напряжений (э. д. с.).

4.6. Обосновать необходимость соблюдения правильной полярности и достаточной плавности изменения компенсирующего напряжения  $U_K$ .

4.7. Руководствуясь разд. V, составить план проведения каждого этапа выполнения рабочего задания.

4.8. Руководствуясь материалами работы № 10, составить план выполнения п. 3.4 рабочего задания с графическими иллюстрациями.

4.9. Привести пример конкретного применения метода сравнения напряжений.

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Перед сборкой цепи индикатор равновесия напряжения кнопкой переводится на наименьшую чувствительность, т. е. на наибольший предел указания напряжения, и размыкается.



5.2. Сборка цепи значительно облегчается, если ее предварительно разбить на отдельные блоки по функциональным признакам. В этом случае в результате соединения блоков между собой по их функциональному назначению получается единая цепь, удобная для выполнения рабочего задания.

5.3. При сборке цепей, содержащих источники постоянного напряжения (тока), следует обращать внимание на полярность. В работе № 1 к индикатору равновесия напряжения должна подаваться разность напряжений  $E_T - U_1$ .

5.4. Оценив примерно температуру макета нагревательной установки по таблице для данной термопары, помещенной в приложении П.1.1, определить значение термо-э. д. с.  $E_T$  термопары. Это значение, умноженное на коэффициент деления, как начальное значение  $U_K = kE_T$ , устанавливается на измерителе- $V$  компенсирующего напряжения  $U_K$ . Лишь после этого включают индикатор равновесия напряжения. Постепенно увеличивая чувствительность индикатора равновесия, регулируют компенсирующее напряжение  $U_K$  изменением положений подвижных контактов резисторов  $r \div 1000 r$  до нулевого показания индикатора равновесия. Запись показаний  $U_K$  измерителя компенсирующего напряжения  $V$  производят при нулевом отклонении световой стрелки индикатора равновесия и его наибольшей чувствительности, т. е. при наименьшем пределе указания (25 мВ).

5.5. Разборка цепи после записи показаний измерителя компенсирующего напряжения начинается с перевода указателя равновесия на наименьшую чувствительность, т. е. на наибольший предел указания, с последующим его выключением.

5.6. В случае, когда последующая цепь отличается от предыдущей лишь некоторыми элементами, места присоединения их обозначают символами, служащими ориентирами при замене прежних элементов на новые. На рис. 1.1 и 1.2 в качестве таких символов взяты буквы  $a, b, в, г$ . Остальная часть цепи является общей для двух схем и поэтому при переходе от одной цепи к другой может не разбираться.

5.7. В схеме рис. 1.2 компенсирующее напряжение  $U_K = r_K I_K$ , где  $r_K = r_1$  — сопротивление используемых четырехзажимных резисторов, входящих в группу из семи последовательно соединенных резисторов;  $I_K$  — компенсирующий ток, показываемый миллиамперметром  $mA$ .

5.8. Результаты измерений и подсчета представить в виде  $t(1 \pm \delta_m \pm \delta_T \pm \delta_n)$ , где  $\delta_m, \delta_T, \delta_n$  — соответственно относительные погрешности метода измерения градуировочных таблиц термопар и средств измерений компенсирующего напряжения  $U_K$ .

Процесс проведения эксперимента с компенсационными измерительными устройствами по рис. 1.1 и 1.2 аналогичен.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Почему э. д. с. маломощных источников не измеряют вольтметром?

6.2. Почему при измерении напряжения методом сравнения отсутствует погрешность метода измерения?

6.3. Приведите примеры с числовыми значениями из практики измерений на различие понятий «точность» и «достоверность».

6.4. Какие преобразователи температуры в электрические величины вы знаете и как их использовать для измерения температуры?

6.5. Какие соотношения положены в основу схемы делителя напряжения и какой прибор схемы рис. 1.1 указывает на соблюдение этих соотношений?

6.6. По какой схеме можно произвести поверку миллиамперметра с помощью вольтметра?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 1.1. Градуировочная таблица термопары хромель — копель

Температура рабочего конца, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	мВ									
+0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,56	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,25	14,34	14,42	14,50	14,58

### П 1.2. Сущность метода сравнения напряжений, его особенности и применение

#### Сущность метода сравнения

Сущность метода сравнения напряжений (э. д. с.) заключается в следующем. Два самостоятельных и независимых источника э. д. с. (напряжения) включаются последовательно встречно через индикатор равновесия напряжений *ИН*, отмечающий наличие или отсутствие напряжения между точками присоединения *ИН*.

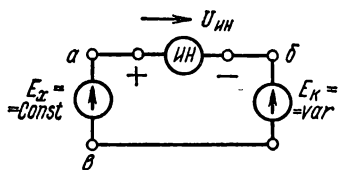


Рис. 1.4

( $E_x = E_K$ ), и независимо от соотношения внутренних сопротивлений  $r_x$ ,  $r_K$ ,  $r_{IN}$  источников э. д. с.  $E_x$ ,  $E_K$  и индикатора равновесия напряжения  $IN$  ток в цепи отсутствует:  $I_x = I_K = I_{IN} = U_{IN}/r_{IN} = 0$ . Отсутствие тока указывает на то, что метод сравнения сводится к нулевому методу.

## Особенности метода сравнения

Отсутствие тока  $I_K$  указывает на многие характерные особенности нулевого метода.

1. Присоединение источника с компенсирующей э. д. с.  $E_K$  к цепи с источником измеряемого напряжения  $U_x$  (э. д. с.  $E_x$ ) не нарушает ее режима, что обеспечивает достоверность и воспроизводимость измерений (п. 8.26 ГОСТ 16263—70).

2. От цепи с измеряемым напряжением  $U_x$  не требуется дополнительного расхода мощности на индикатор равновесия напряжений  $U_x = U_K$ , что позволяет вести достоверные измерения в маломощных цепях (термопары), высокоомных цепях, питаемых источниками с большими внутренними сопротивлениями (небольшие химические батареи).

3. Имеется возможность измерять не только напряжения  $U_x$ , но и э. д. с., так как  $U_x = E_x - r_x I_x$  при  $I_x = 0$  сводится к  $U_x = E_x$ , что не обеспечивается другими методами измерения, например методом непосредственной оценки п. 4.10 ГОСТ 16263—70).

4. Устройство, создающее компенсирующую э. д. с. по отношению к зажимам цепи с измеряемой разностью потенциалов  $V_a - V_b = E_x$ , можно рассматривать как измерительный прибор с бесконечно большим сопротивлением  $r = E_x/I = \infty$ .

## О применении метода сравнения

В данной работе метод сравнения используется для измерения температуры с помощью термопары. При этом  $E_x = E_T$ , а  $E_K = U_K$  измеряется вольтметром. Термо-э. д. с.  $E_T$  термопары определяет температуру  $t$ , следовательно, имеется возможность градуировать вольтметр непосредственно в градусах измеряемой температуры.

Заменим индикатор равновесия напряжения усилителем, работающим на исполнительный механизм. Рассмотрим несколько примеров использования такого модернизированного измерительного устройства.

1. Пусть исполнительный механизм при  $U_{IN} > 0$  уменьшает, а при  $U_{IN} < 0$  увеличивает нагрев нагревательной установки.

В этом случае получим устройство, автоматически устанавливающее температуру, показываемую вольтметром.

2. Пусть исполнительный механизм поворачивает оси подвижных контактов резисторов  $r \div 1000 r$  на повышение  $U_K$  при  $U_{IN} > 0$  и на понижение  $U_K$  при  $U_{IN} < 0$ .

При этом получим автоматический измеритель температуры (автоматический термометр).

## Работа № 2

### ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Уяснить необходимость применения компенсационного устройства для измерения тока маломощного источника.

Ознакомиться с возможностью применения компенсационных измерительных устройств разных типов для измерения малых токов фотодиода.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуется компенсационное измерительное устройство постоянного тока (рис. 2.1), содержащее измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую ФЭ, индикатор равновесия тока ИТ с регулятором чувствительности, масштабный преобразователь

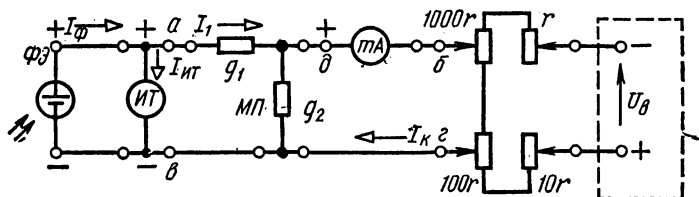


Рис. 2.1

МП с коэффициентом преобразования  $k = I_K/I_1 = (g_1 + g_2)/g_1$ , измеритель  $mA$  компенсирующего тока  $I_K$ , регулятор постоянного напряжения  $r \div 1000r$  и вспомогательный источник с постоянным напряжением  $U_B = \text{const}$ .

Для тех же целей измерения освещенности применяется другое компенсационное измерительное устройство (рис. 2.2), отличающееся

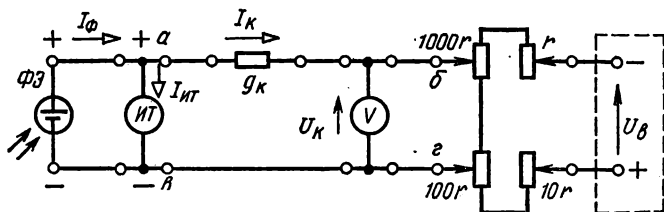


Рис. 2.2

от указанного на рис. 2.1 тем, что измеритель  $mA$  компенсирующего тока  $I_K$  с масштабным преобразователем МП заменен на измеритель  $V$  компенсирующего напряжения со своим электрическим преобразователем  $g_K$  в компенсирующий ток  $I_K = g_K U_K$ .

На рис. 2.3 изображен внешний вид лицевой стороны устанавливаемой на столе стенда переносной панели с условными символами деталей, используемых при выполнении рабочего задания. Применяются также многопредельные магнитоэлектрические миллиамперметр  $mA$

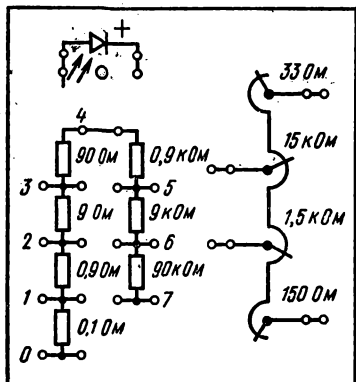


Рис. 2.3

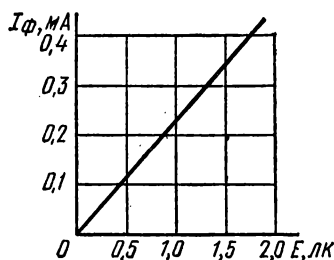


Рис. 2.4

и вольтметр  $V$ , магнитоэлектрический микроамперметр со световой стрелкой и источник питания с постоянным напряжением  $U_B = \text{const}$ , закрепленные на столе стенда.

В качестве измерительного преобразователя неэлектрической величины в электрическую взят фотодиод (полупроводниковый фотоэлемент), закрепленный на поверхности стола стенда. Световая характеристика фотодиода ФД-3 приведена на рис. 2.4.

Индикатором равновесия тока ИТ служит магнитоэлектрический микроамперметр со световой стрелкой на пределы измерения  $\pm 50 \mu A$  с двусторонней шкалой и внутренним сопротивлением  $500 \Omega$ .

Обычно чувствительные приборы, используемые в качестве индикаторов равновесия, снабжаются защитными параллельно включаемыми резисторами, выполняющими роль загрузителей чувствительности приборов. В данной работе этим резисторам наряду с защитными приданы измерительные функции. С этой целью в качестве параллельно включаемых резисторов применены образцовые резисторы, с помощью которых микроамперметр превращен в многопредельный указатель тока с пределамиказания  $0,05; 0,5; 5; 50; 500 \text{ mA}$ .

В качестве масштабного преобразователя используется 7 последовательно соединенных образцовых резисторов, каждый из которых снабжен двумя парами гнезд. Из этих резисторов набирают делитель компенсирующего тока  $I_K$  по схеме, изображенной на рис. 2.5.

Сопротивления между гнездами с отметкой 0 и каждым последующим гнездом с числовыми отметками от 1 до 7 равны соответственно: 0,1; 1; 10; 100 Ом; 1; 10; 100 кОм. Резисторы с такими значениями сопротивлений позволяют набирать делитель тока с различными значениями коэффициента деления  $k$ . В самом деле, при полной компенсации ток  $I_{ИТ} = 0$  и ветви с проводимостями  $g_1$  и  $g_2$  (см. рис. 2.1) можно считать параллельно соединенными. При параллельном соединении токи распределяются прямо пропорционально проводимостям, а при двух ветвях — обратно пропорционально сопротивлениям ветвей:

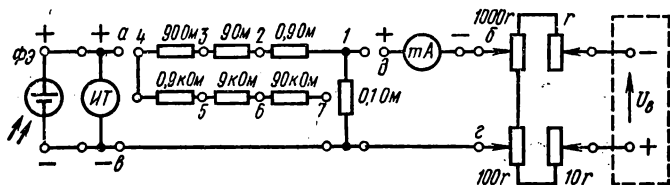


Рис. 2.5

$I_{\phi} = I_K g_1 / (g_1 + g_2) = I_{\phi} = I_K r_2 / (r_1 + r_2) = I_K / k$ , где  $k = (r_1 + r_2) / r_2$  — коэффициент деления. В схеме рис. 2.5 гнездо с пометкой  $a$  может соединяться с гнездами  $2 \div 7$ , а гнездо  $\delta$  — с гнездами  $1 \div 6$ . Введем обозначения: через  $r_1 + r_2 = 10^{m-2}$ , где  $m = 2 \div 7$ , обозначим значения сопротивлений между гнездами с отметками 0 и  $m$ ; через  $r_2 = 10^{n-2}$ , где  $n = 1 \div 6$ , обозначим значения сопротивлений между гнездами с пометками 0 и  $n$ . Тогда коэффициент деления  $k = (r_1 + r_2) / r_2 = 10^{m-n} = 10 \div 10^6$  с различными значениями  $r_2$ .

Измерителем компенсирующего тока  $I_K$  служит магнитоэлектрический многопредельный миллиамперметр  $mA$  с пределами измерения  $I_H = 3; 15; 7,5; 300; 750$  мА.

В качестве измерителя компенсирующего напряжения  $U_K$  применяется магнитоэлектрический многопредельный вольтметр  $V$  с пределами измерения  $U_H = 1,5; 3; 7,5; 15; 75$  В.

Преобразователем компенсирующего напряжения  $U_K$  в компенсирующий ток  $I_K$  могут быть образцовые резисторы с компенсирующей проводимостью  $g_K = g_1$ .

Для плавного изменения постоянного тока следует применить четыре соединенных последовательно регулируемых резистора с номинальными значениями сопротивлений 33; 150 Ом — 1,5; 15 кОм. Гнезда подвижных контактов внешних резисторов с сопротивлениями  $r$  и  $10r$  необходимо соединить с зажимами источника постоянного напряжения  $U_B = \text{const}$ . Гнезда подвижных контактов внутренних резисторов с сопротивлениями 100  $r$  и 1000  $r$  должны быть соединены с вольтметром, измеряющим компенсирующее напряжение  $U_K$ . С помощью этих четырех резисторов с относительными сопротивлениями  $r$ , 10  $r$ , 100  $r$ , 1000  $r$  возможно четырехступенчатое плавное регулирование компенсирующего тока  $I_K$  или компенсирующего напряжения  $U_K$ .

(рис. 2.2). Такое тонкое регулирование компенсирующего напряжения особенно необходимо в процессе компенсации, когда к индикатору равновесия токов *ИТ* подается разность близких по значению токов или напряжений.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осветить фотодиод переносной электрической лампой, к зажимам фотодиода включить измеритель тока. Объяснить полученные результаты.

3.2. Руководствуясь схемой рис. 2.1, собрать элементы компенсационного измерительного устройства постоянного тока с делителем компенсирующего тока и измерить им освещенность стола.

3.3. Руководствуясь схемой рис. 2.2, собрать элементы компенсационного измерительного устройства постоянного тока с электрическим преобразователем компенсирующего напряжения и повторить измерение освещенности стола. Сопоставить полученные результаты с результатами п. 3.2.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. По § 16.1 в [1], ГОСТ 13 600—68, ГОСТ 16 263 — 70 ознакомиться с методами и погрешностями измерения тока.

4.2. В [2] ознакомиться с решениями задач 9.10; 9.11; решить задачи 9.12; 9.17; 9.18 и прочитать § 16.2 в [1]. Уяснить погрешности измерения, вносимые измерителями токов, и обосновать необходимость применения метода сравнения при измерении токов маломощных источников.

4.3. Ознакомиться с материалами, помещенными в приложении П. 2.1, и уяснить сущность и особенности метода сравнения токов.

4.4. Начертить схему соединения резисторов для преобразования неизменного по величине напряжения  $U_{\text{в}} = \text{const}$  на входе в четырехступенчатое, плавно регулируемое напряжение  $U_{\text{к}} = \text{var}$  на выходе и обосновать определенный порядок соединения этих резисторов со входом и выходом.

4.5. Начертить схему компенсационного измерителя тока и его два варианта для измерения малых токов.

4.6. Обосновать необходимость соблюдения правильной полярности и достаточной плавности изменения компенсирующего тока  $I_{\text{к}}$ .

4.7. Руководствуясь разд. V, составить план проведения каждого этапа выполнения рабочего задания.

4.8. Привести пример конкретного применения метода сравнения токов.

## У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. Перед сборкой цепи индикатор равновесия тока кнопкой переводится на наименьшую чувствительность, т. е. на наибольший предел указания тока, и замыкается накоротко.

5.2. Сборка цепи значительно облегчается, если ее предварительно разбить на отдельные блоки по функциональным признакам. В этом случае в результате соединения этих блоков между собой по их функциональному назначению получается единая цепь, удобная для выполнения рабочего задания.

5.3. При сборке цепей, содержащих источники постоянного напряжения (тока), следует обращать внимание на полярность. В работе № 2 к индикатору равновесия тока должна подаваться разность токов  $I_{\phi} - I_1$ .

5.4. Оценив примерно освещенность стола по графику рис. 2.4, определить значение тока  $I_{\phi}$  фотодиода. Это значение, умноженное на коэффициент деления, как начальное значение  $I_k = kI_{\phi}$  устанавливается на измерителе  $mA$  компенсирующего тока  $I_k$ . Лишь после этого снимают с индикатора тока закорачивающую его перемычку. Постепенно увеличивая чувствительность индикатора равновесия, регулируют компенсирующий ток  $I_k$  до нулевого показания индикатора равновесия. Запись показаний  $I_k$  измерителя  $mA$  компенсирующего тока производят при нулевом отклонении световой стрелки индикатора равновесия и его наибольшей чувствительности, т. е. при наименьшем пределе указания (50 мкА).

5.5. Разборка цепи после записи показаний измерителя компенсирующего тока начинается с перевода указателя равновесия на наименьшую чувствительность, т. е. на наибольший предел указания с последующим его замыканием накоротко.

5.6. В случае, когда последующая цепь отличается от предыдущей лишь некоторыми элементами, места присоединения их обозначают символами, служащими ориентирами при замене прежних элементов на новые. На рис. 2.1 и 2.2 в качестве таких символов взяты буквы  $a, b, в, г$ . Остальная часть цепи является общей для двух цепей и поэтому при переходе от одной цепи к другой может не разбираться.

5.7. В схеме рис. 2.2 компенсирующий ток  $I_k = g_k U_k$ , где  $g_k = = g_1$  — проводимость используемых четырехзажимных резисторов, входящих в группу из семи последовательно соединенных резисторов;  $U_k$  — компенсирующее напряжение, показываемое вольтметром  $V$ .

5.8. Результаты измерений и подсчета представить в виде  $E(1 \pm \delta_m \pm \delta_t \pm \delta_n)$ , где  $\delta_m, \delta_t, \delta_n$  — соответственно относительные погрешности метода измерения, графического представления зависимости освещенности  $E$  от тока  $I_{\phi}$  полупроводникового фотоэлемента (см. рис. 2.4) и средств измерений компенсирующего тока  $I_k$ .

Процесс проведения эксперимента с компенсационными измерительными устройствами по рис. 2.1 и 2.2 аналогичен.



## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Почему ток маломощных источников не измеряют непосредственно измерителями тока?

6.2. Почему при измерении тока методом сравнения отсутствует погрешность метода измерения?

6.3. Приведите примеры с числовыми значениями из практики измерений на различие понятий «точность» и «достоверность».

6.4. Какие соотношения положены в основу схемы делителя тока и какой прибор схемы рис. 2.1 указывает на соблюдение этих соотношений?

6.5. По какой схеме можно произвести поверку милливольтметра с помощью амперметра?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 2.1. Сущность метода сравнения токов, его особенности и применение

#### Сущность метода сравнения

Сущность метода сравнения токов заключается в следующем. Два самостоятельных и независимых источника тока включаются согласно и параллельно с индикатором равновесия токов ИТ, отмечающим наличие или отсутствие тока в пассивной ветви  $a-b$  (рис. 2.6).

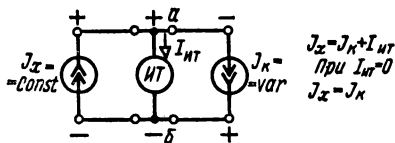


Рис. 2.6

$$\begin{aligned} J_x &= J_k + I_{ИТ} \\ \text{При } I_{ИТ} &= 0 \\ J_x &= J_k \end{aligned}$$

Один из этих токов, неизменный по значению  $J_x = \text{const}$ , требуется определить. Другой ток, известный по значению, обычно можно регулировать:  $J_k = \text{var}$ . Как видно из рис. 2.6, измеряемый ток равен  $J_x = J_k \pm I_{ИТ}$ .

Регулируя известный ток  $J_k$ , добиваются отсутствия тока в пассивной ветви  $a-b$ , что обнаруживают по отсутствию отклонения ( $I_{ИТ} = 0$ ) равновесия тока ИТ. В этом случае неизвестный ток  $J_x$  равен по значению известному току ( $J_x = J_k$ ) и независимо от соотношения внутренних проводимостей  $g_x, g_k, g_{ИТ}$  источников питания и индикатора равновесия тока (ИТ) напряжение между точками  $a$  и  $b$  цепи рис. 2.6 отсутствует:  $U_{ab} = U_x = U_k = I_{ИТ}/g_{ИТ} = 0$ . Отсутствие напряжения указывает на то, что метод сравнения сводится к нулевому методу.

#### Особенности метода сравнения

Отсутствие напряжения  $U_{ab}$  указывает на многие характерные особенности нулевого метода.

1. Подключение источника компенсирующего тока  $J_k$  к цепи с источником измеряемого тока  $J_x$  не нарушает ее режима, что обеспечивает достоверность и воспроизводимость измерений.

2. От цепи с измеряемым током  $J_x$  не требуется дополнительного расхода мощности на индикатор равновесия токов  $J_x = J_k$ , что позволяет вести достоверные измерения в маломощных цепях, например высокоомных (низкосименсных), питаемых источниками с малыми внутренними проводимостями (вакуумные и полупроводниковые фотоэлементы).

3. Имеется возможность измерять не только токи  $I_k$  ветвей, но и токи источников  $J_x$ , так как  $I_x = J_x - g_x U_x$  при  $U_x = 0$  сводится к  $I_x = J_x$ ,

что не обеспечивается другими методами измерения, например методом непосредственной оценки.

4. Устройство, содержащее компенсирующий ток  $J_K$  по отношению к размыкаемым зажимам с измеряемым током  $I_x$ , представляет собой измерительный прибор с бесконечно малым сопротивлением, включаемым последовательно в цепь с измеряемым током.

### **О применении метода сравнения**

В данной работе метод сравнения используется для измерения освещенности с помощью фотодиода. При этом  $J_x = I_\Phi$ , а  $J_K = I_K$  измеряется миллиамперметром. Ток  $I_\Phi$  фотодиода определяет освещенность, следовательно, имеется возможность градуировать миллиамперметр непосредственно в люксах измеряемой освещенности.

Заменим индикатор равновесия тока усилителем, работающим на исполнительный механизм. Рассмотрим несколько примеров использования такого модернизированного измерительного устройства.

1. Пусть исполнительный механизм при  $I_{ит} > 0$  уменьшает, а при  $I_{ит} < 0$  увеличивает освещенность исследуемого места.

В этом случае получим устройство, автоматически устанавливающее освещенность, показываемую вольтметром.

2. Пусть исполнительный механизм поворачивает оси подвижных контактов резисторов  $r \div 1000 r$  на повышение  $I_K$  при  $I_{ит} > 0$  и на понижение  $I_K$  при  $I_{ит} < 0$ .

При этом получим автоматический измеритель освещенности (автоматический люксметр).

## **Работа № 3**

### **ГРАДУИРОВОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, СОДЕРЖАЩЕГО РЕЗИСТОРНЫЙ МОСТ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЛИНЕЙНЫМ ПЕРВИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И АМПЕРМЕТР**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Ознакомиться с методикой определения зависимости электрических величин на выходе (постоянный ток, измеряемый амперметром) от неэлектрических величин на входе (угловое перемещение оси первичного преобразователя) измерительной установки с резисторным мостом постоянного тока.

Приобрести навык настройки резисторного моста в состояние равновесия.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Объектом исследования служит цепь, содержащая три резистора переменного сопротивления, многопредельный амперметр, источник регулируемого постоянного напряжения и первичный преобразо-

ватель углового перемещения в электрический сигнал, включенные по схеме четырехплечного моста.

Все элементы цепи смонтированы на переносной панели, устанавливаемой на универсальном стенде. Внешний вид лицевой стороны этой панели изображен на рис. 3.1. На панели смонтированы также вспомогательные гнезда для облегчения сборки цепи.

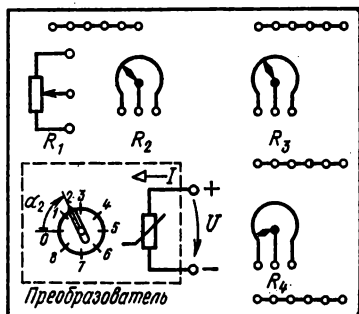


Рис. 3.1

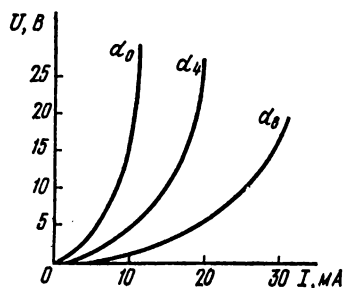


Рис. 3.2

Обмотки регулируемых резисторов имеют сопротивления и номинальные мощности следующих значений:

$R_1$	100 Ом	40 Вт
$R_2$	470 Ом	25 Вт
$R_3$	1,5 кОм	80 Вт
$R_4$	1,5 кОм	80 Вт

Приблизительные вольт-амперные характеристики первичного преобразователя углового перемещения в электрический сигнал приведены на рис. 3.2.

Для измерения тока в мостовой ветви служит многопредельный миллиамперметр. На стенде установлены:

- 1) узкопрофильный миллиамперметр М1730 с пределами измерения 5 мА ÷ 0 ÷ 5 мА;
- 2) многопредельный прибор Ц4213.

Исследуемая цепь присоединяется к источнику питания, допускающему регулирование величины создаваемого им напряжения.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Выявить вольт-амперные характеристики первичного преобразователя при различных угловых перемещениях  $\alpha$  его ротора.

3.2. Подобрать сопротивления резисторов мостовой цепи с первичным преобразователем в одном из плеч моста так, чтобы при  $\alpha = \alpha_0$  ( $\alpha_0$  задается преподавателем) обеспечить баланс моста.

3.3. Выявить градуировочную характеристику — зависимость тока в мостовой ветви от угла  $\alpha$  первичного преобразователя.

3.4. Оценить влияние изменения напряжения источника питания на величину тока мостовой ветви в точке баланса моста.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. По материалам лекционных занятий ознакомиться с анализом мостовой цепи с одним источником питания.

4.2. Ознакомиться с принципом действия и основными особенностями использования электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы [1, с. 317—323]. Обратить внимание на собственное потребление приборов, особенности многопредельных ампервольтметров.

4.3. В [2] ознакомиться с решением задач 1.14; 1.37; 1.38; 2.18; 9.13.

4.4. Ознакомиться с методами измерения сопротивлений [1, с. 349—353].

4.5. В протоколе подготовки к данной работе привести:

а) схему и план проведения эксперимента по выявлению вольт-амперной характеристики первичного преобразователя;

б) схему включения первичного преобразователя в четырехплечую мостовую цепь;

в) план проведения эксперимента по настройке моста на баланс;

г) таблицу для внесения результатов измерения тока в мостовой ветви при выявлении градуировочной характеристики;

д) обоснование ожидаемого результата выполнения п. 3. 4 рабочего задания.

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. При подборе величин сопротивлений резисторов, образующих мостовую цепь, следует помнить, что в состоянии баланса произведения сопротивлений противоположных плеч мостовой цепи равны. Таким образом, необходимо предварительно оценить величину статического сопротивления первичного преобразователя при  $\alpha = \alpha_0$ , а затем подбирать сопротивления резисторов остальных плеч моста. При эксперименте нужно установить найденные значения сопротивлений и, *постепенно повышая* напряжение источника, опытным путем провести точную настройку моста на баланс.

5.2. Работа заканчивается оформлением отчета, в котором необходимо:

привести характеристики первичного преобразователя с оценкой достоверности полученных результатов;

изобразить мостовую цепь с указанием сопротивлений резисто-

ров, ее образующих, и краткой методикой настройки мостовой цепи на баланс;

привести градуировочную характеристику мостового преобразователя при различных напряжениях питания.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. В чем особенность метода амперметра и вольтметра для выявления вольт-амперных характеристик нелинейных элементов?

6.2. Как подобрать величины сопротивлений резисторов в плечах четырехплечного моста для преобразования неэлектрической величины в ток диагонали?

6.3. Каким методом можно аналитически определить градуировочную характеристику мостового преобразователя [2, задача 1.38]?

6.4. Как влияет изменение напряжения питания мостового преобразователя на его градуировочную характеристику [2, задача 2.18]?

## **Работа № 4**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Приобрести навык настройки элементов электрической цепи постоянного тока, моделирующей стационарные процессы в теплообменнике, и научиться использовать данные электрических измерений на модели для анализа режимов теплообменника.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Схема электрической модели теплообменника, исследуемой в работе, представлена на рис. 4.1. Гидравлическая схема теплообменника рассмотрена в разд. VII данной работы.

В качестве аналогов насосов в электрической модели используются установленные на столе регулируемые источники постоянных э. д. с.  $E_1$  и  $E_2$ . Пределы регулирования напряжения источников ( $0 \div 30$ ) В.

Аналогами гидравлических сопротивлений трубопроводов теплообменника на электрической модели служат 6 регулируемых резисторов, смонтированных на переносной панели, установленной на столе. Лицевая сторона переносной панели с условными графическими обозна-

чениями резисторов и схемой расположения выводов концов каждого из них изображена на рис. 4.2. Регулируемые резисторы включаются по схеме реостатов. На рис. 4.2 показано расположение осей подвиж-

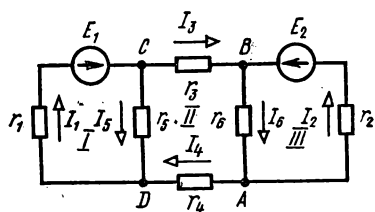


Рис. 4.1

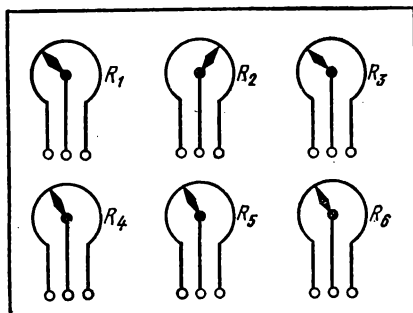


Рис. 4.2

ных (поворотных) контактов резисторов. В табл. 4.1 приведены диапазоны регулирования сопротивлений резисторов.

Таблица 4.1

Номер резистора	1	2	3	4	5	6
Диапазон регулирования, Ом	10÷80	10÷200	20÷200	30÷250	30÷250	30÷250

Для настройки цепи в соответствии с требованиями, изложенными в рабочем задании, на столе стенда имеются многопредельные приборы магнитоэлектрической системы — два вольтметра с пределами измерений 1,5; 3; 7,5; 15; 75 В (шкала имеет 100 делений), два миллиамперметра с пределами измерений 3; 15; 75; 300; 750 мА (шкала имеет 100 делений) и комбинированный прибор — ампервольтметр (авометр).

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Настроить резисторы электрической модели в соответствии с соотношениями длин трубопроводов теплообменника, приведенными в табл. 4.2 для варианта, указанного преподавателем.

Наибольшее сопротивление резистора выбрать равным 200 Ом.

3.2. Настроить электрическую модель на нормальный режим, соответствующий отсутствию расхода резервного насоса. Определить э. д. с.  $E_2$  и токи ветвей, имитирующих змеевики, для нормального режима. Э. д. с. источника питания  $E_1$  поддерживать неизменной и равной 10 В.

Таблица 4.2

Номер варианта	Длина участка					
	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$
I	0	L	2L	2L	10L	10L
II	0	L	L	L	5L	5L
III	L	0	2L	2L	10L	10L
IV	L	0	L	L	5L	5L
V	L	L	0	L	10L	10L
VI	L	L	0	L	5L	5L
VII	L	L	2L	0	10L	10L
VIII	L	L	L	0	5L	5L

3.3. Осуществить на электрической модели режим, соответствующий аварийному отключению насоса, и определить величины токов ветвей, имитирующих элеваторы для этого режима.

3.4. По данным измерений электрических величин модели определить отношение напоров основного и резервного насосов  $k = H_1/H_2$ , обеспечивающее отсутствие расхода резервного насоса в нормальном режиме, и процентные изменения расходов жидкости в элеваторах  $l_5$  и  $l_6$  при аварийном отключении основного насоса по отношению к расходам в нормальном режиме.

#### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Начертить схему электрической модели теплообменника, предусмотрев включение измерительных приборов, необходимых для выполнения рабочего задания.

4.2. Составить таблицу цен деления многопредельных приборов, используемых в работе.

4.3. Руководствуясь § 10.1 и 10.2 [1] и приложением к работе, записать соотношения, которым должны удовлетворять сопротивления резисторов модели, если относительные размеры трубопроводов теплообменника соответствуют одному из вариантов табл. 4.2.

4.4. Составить план проведения экспериментов, предусмотренных рабочим заданием.

#### V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. При выполнении п. 3.1 рабочего задания сопротивления резисторов следует измерять авометром.

5.2. Для измерения токов ветвей, имитирующих элеваторы, рекомендуется использовать многопредельные миллиамперметры, а для ветви, имитирующей участок резервного насоса — авометр, включенный на наибольший предел измерения по току.

5.3. При выполнении п. 3.2 рабочего задания необходимо одновременно плавно повышать э.д.с. источника  $E_2$ , имитирующего резервный насос, и увеличивать чувствительность авометра. После выполнения п. 3.2 авометр должен быть вновь переключен на наибольший предел измерения по току.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какая электрическая величина модели является аналогом:

- а) гидравлического сопротивления участка трубопровода;
- б) напора насоса;
- в) расхода жидкости в трубопроводе?

6.2. Больше или меньше единицы отношение э. д. с.  $k = E_1/E_2$ , обеспечивающее работу электрической модели в режиме, соответствующем холостому ходу резервного насоса теплообменника?

Как зависит отношение  $k$  от абсолютного значения э. д. с.  $E_1$ ?

6.3. Одинаковы ли токи ветвей модели, имитирующих змеевики теплообменника, в нормальном режиме?

6.4. Может ли перестройка работы электрической модели из режима, соответствующего нормальной работе теплообменника, в режим, соответствующий аварийному режиму, привести к изменению направления тока в каких-либо ветвях модели?

6.5. Одинаковы ли в процентном отношении изменения токов ветвей модели, имитирующих змеевики теплообменника, при переходе в аварийный режим по отношению к токам нормального режима?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЕ

Гидравлическая схема теплообменника изображена на рис. 4.3.

Бесперебойная принудительная циркуляция масла в змеевиках теплообменника  $l_5$  и  $l_6$  обеспечивается основным насосом, создающим напор  $H_1$ , и резервным насосом, создающим напор  $H_2$ . С помощью специальных регуляторов величины напорov  $H_1$  и  $H_2$  поддерживаются неизменными.

Соотношение напорov  $k = H_1/H_2$ , создаваемых насосами, выбирают таким, чтобы в нормальном режиме резервный насос работал на холостом ходу, т. е. циркуляция масла на участке трубопровода  $l_2$  отсутствовала (расход  $Q_2$  равен нулю); при аварийном отключении основного насоса циркуляция масла в змеевиках поддерживается резервным насосом.

Исследования проводятся в предположении, что движение масла можно считать ламинарным, поэтому гидравлические сопротивления участков не зависят от расхода жидкости ( $A_l = \text{const}$ ) и стационарное состояние теплообменника описывается системой алгебраических линейных уравнений:

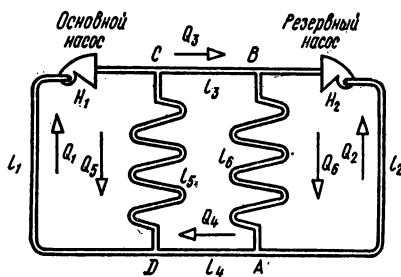


Рис. 4.3



$$Q_1 - Q_3 - Q_6 = 0 \quad (\text{узел } C),$$

$$Q_3 - Q_2 - Q_6 = 0 \quad (\text{узел } B),$$

$$-Q_1 + Q_5 + Q_4 = 0 \quad (\text{узел } D),$$

$$A_1 Q_1 + A_5 Q_5 = H_1 \quad (\text{контур } I),$$

$$A_3 Q_3 + A_4 Q_4 - A_5 Q_5 + A_6 Q_6 = 0 \quad (\text{контур } II),$$

$$A_2 Q_2 + A_6 Q_6 = H_2 \quad (\text{контур } III),$$

где  $H_1$  и  $H_2$  — соответственно напор основного и резервного насосов;  $Q_i$  — расход масла на  $i$ -м участке;

$A_i$  — гидравлическое сопротивление  $i$ -го участка трубопровода.

Система теплообменника выполнена из труб одного диаметра, поэтому гидравлические сопротивления участков трубопровода  $A_i$  пропорциональны их длинам:

$$A_1 : A_2 : A_3 : A_4 : A_5 : A_6 = l_1 : l_2 : l_3 : l_4 : l_5 : l_6.$$

## Работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ НА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ ЕЕ УЧАСТКОВ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получить навык настройки неразветвленной цепи, содержащей конденсатор и индуктивно-резистивный приемник, на режим фазовращателя с постоянной амплитудой выходного напряжения.

Ознакомиться с экспериментальными методами определения параметров пассивных приемников, а также с возможностью применения осциллографа в качестве измерителя углов сдвига фаз между напряжениями участков цепи.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

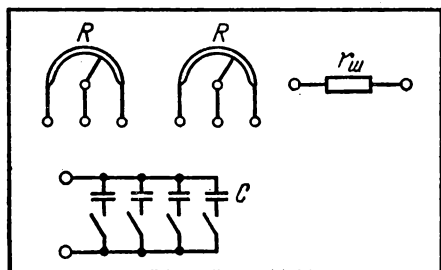


Рис. 5.1

Исследуется неразветвленная цепь, собираемая из двух регулируемых резисторов, дросселя и батареи конденсаторов, которые смонтированы на переносной панели, установленной на столе стенда. На рис. 5.1 изображен внешний вид лицевой стороны панели.

Обмотки регулируемых резисторов имеют сопротивления

680 Ом, допустимый (номинальный) ток дросселя 0,5 А, емкость батареи конденсаторов может быть изменена от 0,1 до 64 мкФ.

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, на приборном щите стенда имеются многопредельные миллиамперметр с пределами измерений 300; 750; 1500 мА и вольтметр с пределами измерений 7,5; 15; 75; 150 В, а на столе стенда установлены осциллограф с коммутатором (см. приложение П 5.1).

Исследуемая цепь присоединяется к источнику питания, допускающему плавное регулирование амплитуды создаваемого им напряжения.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Настроить участок цепи с последовательным соединением дросселя и батареи конденсаторов на режим резонанса напряжений и определить индуктивное сопротивление дросселя при частоте 50 Гц. Напряжение источника питания  $U = 20$  В.

3.2. Установить в неразветвленной цепи, содержащей конденсатор, дроссель и регулируемые резисторы, такой режим, при котором амплитуда напряжения участка с последовательным соединением дросселя и резисторов была бы равна амплитуде напряжения источника питания, а угол сдвига фаз между этими напряжениями был равен углу, заданному табл. 5.1:

Таблица 5.1

Номер бригады	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Напряжение источника питания, В	20	30	20	30	40	30	30	20
Угол сдвига фаз, град	30	60	90	30	60	90	180	120

Зарисовать осциллограммы напряжений и определить, при каких величинах емкости конденсатора и суммарного активного сопротивления цепи наступает этот режим.

Определить диапазоны возможного изменения угла сдвига фаз указанных напряжений за счет изменения сопротивлений двух регулируемых резисторов, включенных в цепь.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Руководствуясь п. 3.1 рабочего задания, начертить схему цепи со всеми необходимыми измерительными приборами. Около символа каждого прибора на схеме указать рабочий предел его измерений.

Записать формулу для расчета индуктивного сопротивления дросселя по данным опыта. Перечислить, какие приборы могут служить индикаторами резонансного состояния исследуемой цепи.

4.2. Составить таблицу цен делений шкал многопредельных при-

боров, используемых в работе, если число делений всех приборов равно 75.

4.3. По приложению П 5.1 ознакомиться со схемой включения осциллографа с коммутатором.

4.4. По приложению П 5.2 ознакомиться с фазовращателем напряжения. Начертить схему фазовращателя со всеми необходимыми для выполнения п. 3.2 рабочего задания измерительными приборами и коммутатором осциллографа. Указать, изменением параметра какого элемента фазовращателя можно добиться равенства амплитуд входного и выходного напряжений. Указать, как измерить активное сопротивление цепи фазовращателя, обеспечивающего заданный сдвиг фаз между этими напряжениями.

## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. При выполнении п. 3.1 рабочего задания необходимо учесть, что напряжения на реактивных элементах при резонансе могут в несколько раз превышать напряжение источника питания, поэтому переключатель пределов вольтметра устанавливают на максимальный предел 150 В.

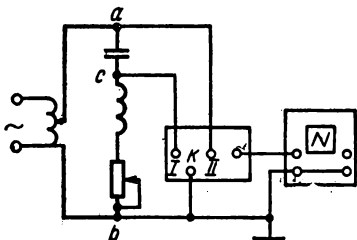


Рис. 5.2

5.2. При выполнении п. 3.2 рекомендуется предварительно рассчитать емкость конденсатора, обеспечивающую равенство амплитуд входного и выходного напряжений, по индуктивному сопротивлению, определенному в п. 3.1, и установить это значение с помощью тумблеров батареи конденсаторов. Затем, плавно изменяя сопротивление резисторов, добиться заданного угла сдвига фаз.

5.3. При подключении осциллографа с коммутатором следует обратить внимание на то, что один из зажимов коммутатора *K* является общим для двух входных и одного выходного зажимов: именно к нему необходимо подключить заземленный вывод осциллографа и общий полюс тех участков цепи, с которых снимаются исследуемые напряжения (рис. 5.2).

5.4. Отчет должен содержать схему фазовращателя напряжений с указанием величин всех элементов цепи и осциллограмм напряжений.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Какое явление называется резонансом напряжений? Каково условие резонанса?

6.2. Изменением каких параметров можно получить режим резонанса напряжений?

6.3. С помощью каких приборов и по каким признакам можно судить о наступлении резонанса напряжений?

6.4. Сохранится ли равенство амплитуд входного и выходного напряжений фазовращателя, если  $x_C = x_L = r$ ?

6.5. Влияет ли величина сопротивления резистора на амплитуду и фазу выходного напряжения фазовращателя?

6.6. В каких пределах изменяется фазовый сдвиг выходного напряжения по отношению к входному при изменении сопротивления резистора от 0 до  $\infty$ ?

6.7. Чему равен фазовый сдвиг выходного напряжения по отношению к входному, если  $x_C = 2x_L = 2r$ ?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 5.1. Применение осциллографа для измерения угла сдвига фаз двух напряжений

Как известно, отклонение светового пятна на экране электронного осциллографа пропорционально напряжению, приложенному к отклоняющим пластинам. Это свойство однолучевого осциллографа дает возможность измерить угол сдвига фаз двух синусоидальных напряжений одинаковой частоты. Если одно из них подать на горизонтальный вход осциллографа, а другое — на вертикальный, то на экране появится изображение эллипса, форма и ориентация которого относительно осей зависят от фазовых соотношений между этими напряжениями.

Из построений, приведенных на рис. 5.3, следует, что угол  $\varphi$  сдвига фаз напряжений, действующих между отклоняющими пластинами осциллографа, можно оценить по формуле

$$\sin \varphi = u_0 / U_m.$$

При совпадении фаз исследуемых напряжений эллипс сжимается в прямую линию, что указывает на возможность применения осциллографа в качестве индикатора резонансного состояния участков цепей.

Во избежание коротких замыканий цепи зажимы отклоняющих пластин осциллографа необходимо соединить с полюсами двух исследуемых участков цепи так, чтобы их общий полюс был соединен с заземленным выводом осциллографа, как показано на схеме рис. 5.4.

При помощи специальной приставки на экране однолучевого осциллографа можно получить неподвижное изображение двух графиков, отражающих зависимость от времени двух синусоидальных напряжений одинаковой частоты, и по положению этих графиков определить угол сдвига фаз исследуемых напряжений. Такую возможность обеспечивает двухканальный электронный переключатель (коммутатор), выполняющий роль поочередного преобразователя двух синусоидальных напряжений низкой частоты в высокочастотные импульсы. Отличительная особенность этих импульсов заключается в том, что их уровень и полярность полностью соответствуют мгновенным значениям и полярности преобразуемых напряжений, а также в том, что они возникают на выходных зажимах поочередно: импульсы, обусловленные одним напряжением, возникают во время интервалов между импульсами, обусловленными другим напряжением, и наоборот (рис. 5.5).

При соединении выходных зажимов коммутатора с входными зажимами вертикальных отклоняющих пластин осциллографа световое пятно на его экране занимает положение, соответствующее уровню и полярности импульсов. Поскольку частота следования импульсов велика (несколько десятков килогерц), траектории перемещения светового пятна будут восприняты наблюдателем как два графика зависимости исследуемых напряжений от времени.

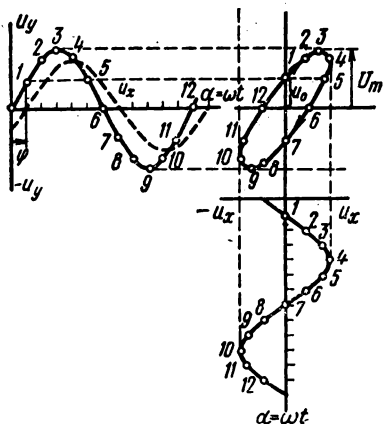


Рис. 5.3

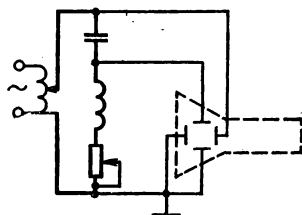


Рис. 5.4

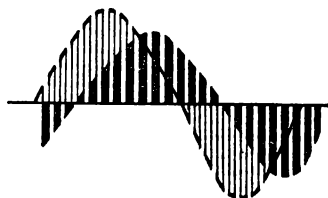


Рис. 5.5

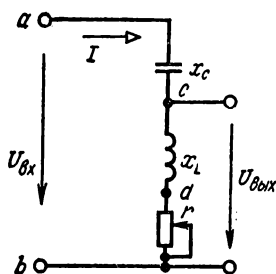


Рис. 5.6

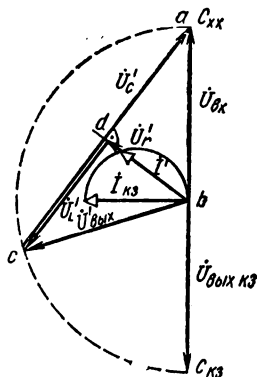


Рис. 5.7

## П 5.2. Фазовращатель напряжения

Неразветвленную цепь, содержащую конденсатор, катушку и резистор (рис. 5.6), можно настроить на такой режим, при котором амплитуда напряжения участка с последовательным соединением катушки и резистора  $U_{выхт}$  была бы равна амплитуде напряжения источника питания  $U_{вхт}$  и не зависела от сопротивления резистора. Однако угол сдвига фаз этих напряжений будет изменяться. Можно показать, что такой режим наступает при условии  $x_C = 2x_L$ . Для доказательства этого положения построены круговые диаграммы тока и выходного напряжения (рис. 5.7) при изменении сопротивления резистора от 0 до  $\infty$ . Круговая диаграмма выходного напряжения  $\dot{U}_{вых}$  построена для трех режимов:

- а) короткое замыкание ( $r = 0$ ),  $\dot{U}_{вых.к.з} = -\dot{U}_{вх}$ ;
- б) холостой ход ( $r = \infty$ ),  $\dot{U}_{вых.х.х} = \dot{U}_{вх}$ ;
- в) промежуточный режим ( $r = x_L$ ),  $\dot{U}_{вых} = \dot{U}_{r'} \oplus \dot{U}_{L'}$ .

Очевидно, что вектор выходного напряжения есть радиус окружности и, следовательно, его амплитуда не зависит от величины сопротивления резистора.

## Работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ НА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТОКАМИ В ЕЕ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ВЕТВЯХ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получить навык настройки конденсатора, соединенного параллельно с индуктивно-резистивным приемником, на режим стабилизации амплитуды тока в сети при изменении активного сопротивления этого приемника.

Ознакомиться с возможностью применения ваттметра в качестве индикатора резонансного состояния участков цепей и измерителя реактивной мощности.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служит цепь с параллельным соединением ветвей, содержащих батарею конденсаторов со ступенчатым регулированием емкости, нерегулируемый дроссель и два регулируемых резистора.

Все элементы цепи смонтированы на переносной панели, установленной на столе стенда. Там же укреплены нерегулируемый резистор с сопротивлением 5 Ом, используемый для осциллографирования тока, и элементы мостового фазовращателя напряжения. На рис. 6.1 изображен внешний вид лицевой стороны панели.

Обмотки регулируемых резисторов имеют сопротивления 680 Ом, допустимый (номинальный) ток дросселя 1,5 А, емкость батареи конденсаторов может быть изменена от 0,1 до 64 мкФ. Пара резисторов и пара конденсаторов, образующих мостовой фазовращатель, имеют такие параметры, что при частоте напряжения сети 50 Гц их сопротивления равны друг другу.

Для наблюдения процесса изменения угла сдвига фаз тока в неразветвленной части цепи по отношению к напряжению сети на столе стенда имеется осциллограф с коммутатором (см. приложение П 5.1).

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, можно воспользоваться миллиамперметром (пределы измерения 300; 750; 1500 мА) и вольтметром (пределы измерения 7,5; 15; 75; 150 В), расположенными на приборном щите стенда. Число делений ампермет-

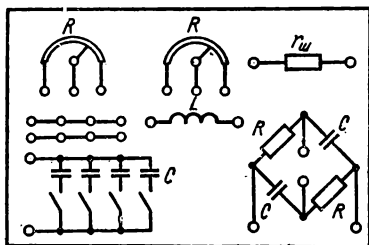


Рис. 6.1

ра и вольтметра равно 75. Ваттметр типа Д 539 с двумя пределами измерения по току (0,5 и 1,0А) и четырьмя пределами измерения по напряжению (30; 75; 150; 300 В) установлен на столе стенда. Число делений ваттметра равно 100.

Исследуемая цепь присоединяется к источнику питания, допускающему регулирование амплитуды создаваемого им напряжения.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Собрать цепь с параллельным соединением батареи конденсаторов и дросселя и настроить ее на режим резонанса токов. При помощи амперметров и вольтметра определить индуктивное сопротивление дросселя.

3.2. Дополнить ветвь с дросселем регулируемым резистором и установить, при какой емкости батареи конденсаторов амплитуда тока в неразветвленной части цепи не будет зависеть от величины сопротивления резистора, включенного последовательно с дросселем.

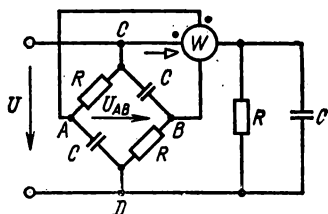


Рис. 6.2

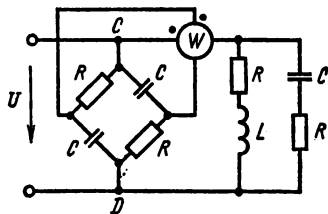


Рис. 6.3

Определить предел изменения угла сдвига фаз тока в неразветвленной части цепи по отношению к напряжению источника питания. Для минимального и максимального углов сдвига зарисовать осциллограммы напряжения источника питания и напряжения на вспомогательном резисторе с сопротивлением 5 Ом.

3.3. Собрать цепь по схеме рис. 6.2. Установить емкость батареи конденсаторов и напряжение источника питания в соответствии с табл. 6.1.

Таблица 6.1

Номер бригады	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Емкость батареи конденсаторов, мкФ	40	40	30	30	40	40	50	55
Напряжение источника питания, В	40	50	50	60	70	80	80	85

Измерить реактивную мощность батареи конденсаторов и убедиться, что при ее отключении стрелка прибора электродинамической системы устанавливается у отметки «0».

3.4. Дополнить дросселем ветвь с резистором, а ветвь с батареей конденсаторов — резистором (рис. 6.3) и исследовать возможность настройки цепи на режимы резонанса токов в условиях, заданных табл. 6.2 для варианта, указанного преподавателем. Напряжение источника питания  $U = 80$  В.

Таблица 6.2

Номер бригады	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Емкость батареи конденсаторов, мкФ	Регулировать	10	10	Регулировать	10	10	10	Регулировать
Сопротивление резистора в ветви с дросселем, Ом	300	Регулировать	300	100	Регулировать	100	Регулировать	300
Сопротивление резистора в ветви с конденсатором, Ом	300	300	Регулировать	200	200	Регулировать	200	200

По данным опыта построить годографы вектором токов, отметив на них точки, соответствующие резонансным режимам.

#### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Руководствуясь приложением П 5.1 и п. 3.1 рабочего задания, начертить схему цепи со всеми необходимыми измерительными приборами и коммутатором осциллографа. Около символа каждого прибора на схеме указать рабочий предел его измерений.

Построить годограф вектора тока в неразветвленной части этой цепи при изменении емкости конденсатора. Отметить на годографе точку, соответствующую резонансу токов. Указать, какие приборы могут служить индикаторами резонансного режима исследуемой цепи.

Построить векторную диаграмму токов при резонансе и, руководствуясь ею, составить формулы для расчета индуктивного сопротивления дросселя по известным величинам токов ветвей и напряжения на разветвлении.

4.2. Составить таблицу цен делений шкал многопредельных приборов, используемых в работе.

4.3. По приложению П 6.1 ознакомиться с фазовращателем тока.

4.4. По приложению П 6.2 ознакомиться с измерительным устройством, содержащим ваттметр и мостовой фазовращатель напряжения.

4.5. Указать, какие приборы и в какие ветви цепи рис. 6.3 надо включить для выполнения п. 3.4 рабочего задания.



## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. При сборке всех цепей рекомендуется использовать переходные планки, смонтированные на переносной панели в качестве узловых точек.

5.2. Все пересоединения, осуществляемые при переходе от одного опыта к другому, допускаются только при отсутствии напряжения источника питания, т. е. при положении ручек регулятора источника питания в позиции «Нуль».

5.3. При подключении осциллографа с коммутатором следует обратить внимание на то, что один из зажимов коммутатора  $K$  является общим для двух входных и одного выходного зажимов; именно к нему необходимо подключить заземленный вывод осциллографа и общий полюс тех участков, с которых снимаются исследуемые напряжения.

5.4. Отчет должен содержать схему фазовращателя тока с указанием величин всех элементов цепи и осциллограммы напряжений, а также данные опытов 3.3 и 3.4.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Какое явление называется резонансом токов?

6.2. При каком соотношении параметров цепи возможен резонанс токов?

6.3. Можно ли добиться режима резонанса токов изменением активных сопротивлений?

6.4. С помощью каких приборов и по каким признакам можно опытным путем определить наступление резонанса в схеме цепи рис. 6.3?

6.5. Будет ли зависеть величина амплитуды тока в неразветвленной части цепи от сопротивления резистора  $R$  (см. рис. 6.4), если  $x_C = x_L$ ?

6.6. В каких пределах изменяется фазовый сдвиг тока по отношению к напряжению цепи фазовращателя тока?

6.7. Какой вид имеет круговая диаграмма тока в неразветвленной части цепи при изменении сопротивления резистора в ветвях с конденсатором? В ветви с дросселем?

6.8. Какой вид имеет круговая диаграмма тока в неразветвленной части цепи при изменении емкости батареи конденсаторов? Когда при этом возникнет один резонансный режим, когда — два? Когда не может наступить резонанс токов?

## **VII. ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **П 6.1. Фазовращатель тока**

Цепь, состоящую из конденсатора, соединенного параллельно с дросселем и регулируемым резистором (рис. 6.4), можно настроить на такой режим, при котором амплитуда тока в неразветвленной части цепи не зависит от сопро-

тивления резистора. При этом угол сдвига фаз тока по отношению к напряжению будет изменяться. Для создания такого режима необходимо, чтобы  $x_C = 2x_L$ . В качестве иллюстрации этого положения на рис. 6.5 приведена круговая диаграмма тока в неразветвленной части цепи. Диаметр окружности является ток короткого замыкания  $I_{2кз} = U/(jx_L)$ , амплитуда которого  $I_{2кзм} = 2I_{1м}$ . Очевидно, что вектор тока в неразветвленной части цепи всегда является радиусом окружности и, следовательно, его амплитуда не зависит от величины сопротивления резистора.

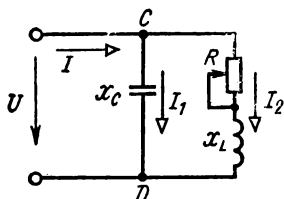


Рис. 6.4

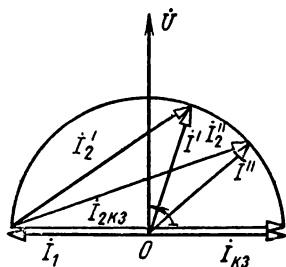


Рис. 6.5

## П 6.2. Устройство для измерения реактивной мощности однофазных приемников

Реактивная мощность однофазной цепи может быть измерена прибором электродинамической системы. Известно, что угол отклонения  $\alpha$  ваттметра пропорционален произведению трех величин  $\alpha = CUI \cos(\hat{U})$ . Это произведение не всегда выражает активную мощность; все зависит от фазового соотношения между током и напряжением. Если, например, изменить фазу напряжения на  $90^\circ$ , то ваттметр измерит реактивную мощность приемника. Для обеспечения такого сдвига фаз применен фазовращатель напряжения, схема цепи которого приведена на

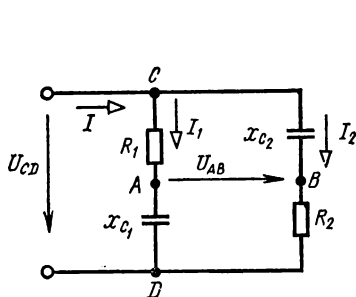


Рис. 6.6

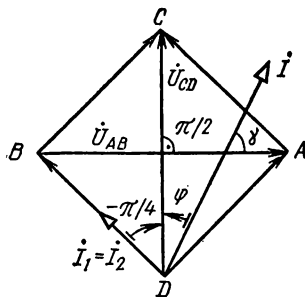


Рис. 6.7

рис. 6.6. Если построить векторную диаграмму цепи (рис. 6.7), то окажется, что при  $r_1 = r_2 = x_1 = x_2$  напряжение  $U_{AB}$  равно напряжению  $U_{CD}$ , но сдвинуто относительно его на угол  $\pi/2$ . Угол  $\gamma = \frac{\pi}{2} - \varphi$ , а  $\cos \gamma = \cos(\pi/2 - \varphi) = \sin \varphi$ . Отсюда показание ваттметра, включенного по схеме рис. 6.2, равно произведению  $U_{AB}/\cos \gamma = U_{AB}/\sin \varphi$ , т. е. реактивной мощности  $Q$ .

## Работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОФАЗНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ ЗВЕЗДОЙ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить влияние изменения параметров одного из трех однофазных приемников, соединенных звездой и включенных в четырехпроводную сеть, на ток в нейтральном проводе, а также на суммарную активную мощность всей группы этих приемников и на напряжения между зажимами каждого из них при включении в трехпроводную сеть.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемую трехфазную цепь собирают из трех однофазных приемников — резисторов и дросселей (расположенных на переносной панели), соединяемых звездой и включаемых в четырехпроводную или трехпроводную трехфазную цепь с линейным напряжением  $U = 38$  В.

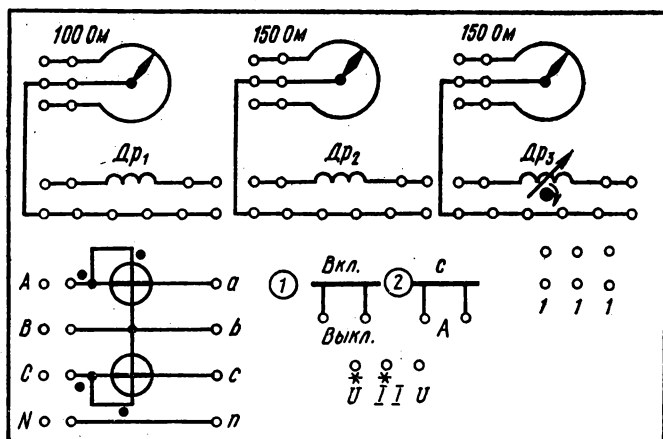


Рис. 7.1

На рис. 7.1 изображен внешний вид лицевой стороны переносной панели с условными символами укрепленных на ней устройств. В верхнем ряду — гнезда трех регулируемых резисторов на 100, 150 и 150 Ом при допустимом токе 0,5 А. Во втором ряду — гнезда трех дросселей типа 1УБН, два из них не регулируются и имеют одинаковую индуктивность, третий дроссель — с регулируемой индуктивностью.

В нижней части панели изображена мнемоническая схема устройства для измерения мощности трехфазной цепи одним ваттметром. В работе используется ваттметр типа Д539 с пределами измерения: по току 0,5; 1,0 А и по напряжению 30; 75; 150; 300 В. Шкала ваттметра имеет 150 делений.

Для измерения токов и напряжений, предусмотренных рабочим заданием, на приборном щите стенда вмонтированы многопредельные приборы электромагнитной системы: три миллиамперметра (пределы измерения 300; 750; 1500 мА), три амперметра (пределы измерения 1; 3А), вольтметр (пределы измерения 75; 150; 300 В) и авометр.

### **III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ**

3.1. Установить подвижные контакты всех трех резисторов примерно посредине между крайними положениями, соединить их звездой, включить в четырехпроводную сеть и настроить на симметричный режим работы. Определить по показаниям приборов параметры схемы замещения.

3.2. Увеличить сопротивление одного из резисторов до максимально возможной величины, проследить за изменением тока в нейтральном проводе и построить годограф вектора этого тока.

3.3. В цепи, собранной и настроенной на режим согласно п. 3.1, включить дроссели последовательно с резисторами и, изменяя индуктивность регулируемого дросселя, добиться симметричного режима группы приемников. Определить параметры схемы замещения.

3.4. В цепи, собранной и настроенной на режим согласно п. 3.3, отключить нейтральный провод, изменить сопротивление одного из резисторов и определить суммарную мощность группы приемников, а также напряжения между зажимами каждого из них и напряжение между нейтральными. По данным опыта построить потенциальную диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов.

### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Руководствуясь [1, § 7.3; 7.4; 16.3], составить схемы соединения элементов цепей с включением приборов, необходимых для выполнения всех этапов рабочего задания. Около символов приборов проставить рабочие пределы измерения.

4.2. Нарисовать схемы замещения цепей, собираемых согласно п. 3.1 и 3.3 рабочего задания.

4.3. Записать формулы, необходимые для расчета величин, предусмотренных рабочим заданием.

4.4. Построить векторную диаграмму напряжений и токов цепи, собранной и настроенной на режим согласно п. 3.3 и 3.4 рабочего задания.

4.5. Рассмотреть решение задач 6.3; 6.10 [2].

## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Симметричный режим работы, рекомендованный в п. 3.1 и 3.3 рабочего задания, устанавливают по показаниям амперметров.

5.2. Для определения параметров схемы замещения следует воспользоваться показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра.

5.3. Для измерения напряжения между нейтральными необходимо использовать авометр.

5.4. При изменении сопротивления одной из фаз (п. 3.2) нельзя допускать короткого замыкания резистора.

5.5. При включении ваттметра необходимо обратить внимание на генераторные зажимы. Если при измерении мощности стрелка ваттметра отклонится в противоположную сторону, то показание прибора нужно взять с обратным знаком.

5.6. Потенциальные и векторные диаграммы рекомендуется строить в соответствующем масштабе. По показаниям приборов и расположению векторов, изображенных на диаграммах, определить фазовые соотношения между напряжениями на резистивных элементах.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. В чем отличие и преимущества трехпроводных и четырехпроводных цепей?

6.2. Какова роль нейтрального провода? Почему в него не включают предохранители, разъединители?

6.3. Почему опасно короткое замыкание одной фазы приемника в четырехпроводной цепи?

6.4. Почему при симметричной нагрузке нейтральный провод не нужен?

6.5. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении нагрузки звездой?

6.6. Как аналитически и графически определить напряжение между нейтральными?

6.7. Какими способами можно измерить мощность в четырехпроводной и трехпроводной цепях?

6.8. Как по показаниям ваттметров определить род симметричной нагрузки?

## Работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОФАЗНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить влияние изменения параметров одного из трех однофазных приемников, соединенных треугольником и включенных в трехпроводную сеть, на амплитудно-фазовые соотношения между линейными токами.

Ознакомиться с методом измерения коэффициента мощности трехфазной установки, собранной из трех одинаковых однофазных приемников, соединенных треугольником, и приобрести навык повышения этого коэффициента при помощи батареи конденсаторов.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемую трехфазную цепь собирают из резисторов и дросселей (расположенных на переносной панели), соединяемых треугольником и включаемых в трехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_{\Delta} = 38 \text{ В}$ .

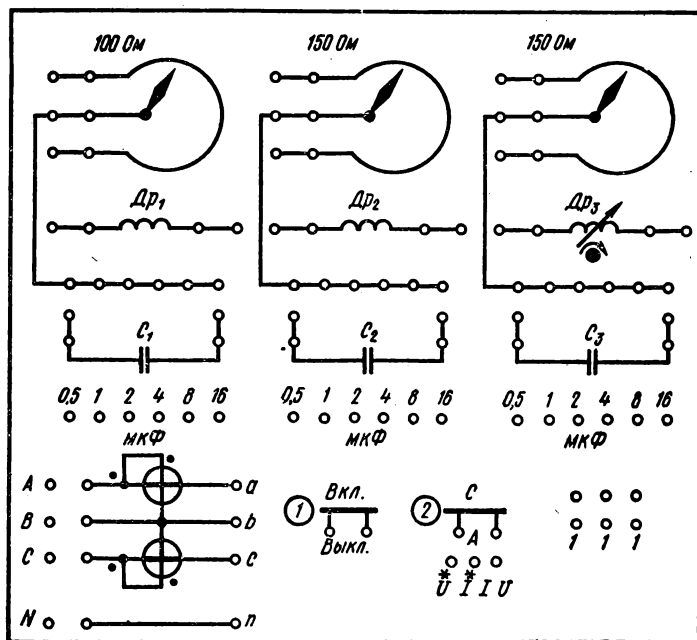


Рис. 8.1

На рис. 8.1 изображен внешний вид лицевой стороны переносной панели с условными символами укрепленных на ней устройств. В верхнем ряду — гнезда трех регулируемых резисторов на 100, 150 и 150 Ом при допустимом токе 0,5 А. Во втором ряду — гнезда трех дросселей типа 1УБН, два из них не регулируются и имеют одинаковую индуктивность, а индуктивность третьего дросселя может регулироваться. В последнем ряду находятся гнезда трех батарей конденсаторов с емкостями 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16 мкФ, устанавливаемых при помощи тумблеров.

В нижней части панели изображена мнемоническая схема для измерения мощности трехфазной цепи одним ваттметром. В работе используется ваттметр типа Д539 с пределами измерения: по току 0,5; 1,0 А и по напряжению 30; 75; 150; 300 В. Шкала ваттметра имеет 150 делений.

Для измерения токов и напряжений, предусмотренных рабочим заданием, на приборном щите стенда вмонтированы многопредельные приборы электромагнитной системы: три миллиамперметра (пределы измерения 300; 750; 1500 мА), три амперметра (пределы измерения 1; 3 А), вольтметр (пределы измерения 75; 150; 300 В) и авометр.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Установить подвижные контакты всех трех резисторов примерно посередине между крайними положениями, соединить их треугольником, включить в трехпроводную сеть и настроить на симметричный режим работы. Определить суммарную мощность группы резисторов и параметры схемы замещения.

3.2. В цепи, собранной согласно п. 3.1, увеличить сопротивление одного из резисторов до максимально возможной величины, а затем отключить его от линейного провода. Определить суммарные мощности группы резисторов и построить векторные диаграммы фазных и линейных токов для обоих случаев.

3.3. В цепи, собранной и настроенной на режим согласно п. 3.1, включить дроссели последовательно с резисторами и, изменяя индуктивность регулируемого дросселя, добиться симметричного режима группы приемников. Определить параметры схемы замещения группы этих приемников, коэффициент мощности и величину реактивной мощности.

3.4. В цепь, собранную и настроенную на режим согласно п. 3.3, включить трехфазную симметричную батарею конденсаторов, соединенных треугольником, и определить, при какой емкости каждой фазы батареи конденсатора токи в линейных проводах будут минимальными. Построить векторные диаграммы фазных и линейных токов цепи до и после включения батареи конденсаторов.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Руководствуясь [1, § 7.3; 7.4; 7.6 и 16.3], составить схемы соединения элементов цепей с включением приборов, необходимых для выполнения всех этапов рабочего задания. Около символов приборов проставить рабочие пределы измерения.

4.2. Нарисовать схему замещения цепи, собираемой согласно п. 3.3 рабочего задания.

4.3. Записать формулы, необходимые для расчета величин, предусмотренных рабочим заданием.

4.4. Построить векторную диаграмму фазных и линейных токов цепи, собранной и настроенной на режим согласно п. 3.3 рабочего задания.

4.5. Рассмотреть решение задачи 6.8 [2].

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Симметричный режим работы, рекомендованный в п. 3.1 рабочего задания, устанавливают по одинаковым показаниям амперметров в фазах приемника и линии. При изменении сопротивлений в фазах нагрузки нельзя допускать режимов короткого замыкания.

5.2. Симметричный режим в фазах приемника с заданным значением коэффициента мощности может быть установлен в каждой фазе отдельно по расчетным величинам  $I_{\phi}$  и  $P_{\phi}$ .

5.3. Векторная диаграмма однофазной установки с конденсатором для улучшения коэффициента мощности рассмотрена в задаче 4.54 [2].

#### **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. В чем достоинства и недостатки схемы соединения треугольником?

6.2. Как будут изменяться линейные токи при изменении сопротивления одной из фаз приемника?

6.3. Каково соотношение между фазными и линейными токами при соединении нагрузки треугольником?

6.4. Изобразите схему включения ваттметров для измерения активной мощности в трехпроводной цепи.

6.5. Какая нагрузка считается равномерной, однородной?

6.6. Какова важная особенность соединения фаз приемника треугольником?

6.7. Каким образом по показаниям ваттметров, включенных по схеме двух ваттметров для измерения активной мощности, определить реактивную мощность приемника?



## Работа № 9

### АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с методикой экспериментального определения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) электрических фильтров.

Овладеть навыками использования этих характеристик для построения диаграммы амплитудно-частотного спектра выходного сигнала по заданному гармоническому составу сложного сигнала на входе.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуются электрические четырехполюсники, собранные из резисторов, конденсаторов и индуктивных катушек. Эти четырехполюсники смонтированы на переносной панели, установленной на столе. На переносной панели, кроме того, смонтирован преобразователь синусоидального напряжения (ГНН) в напряжение сложной формы. Для

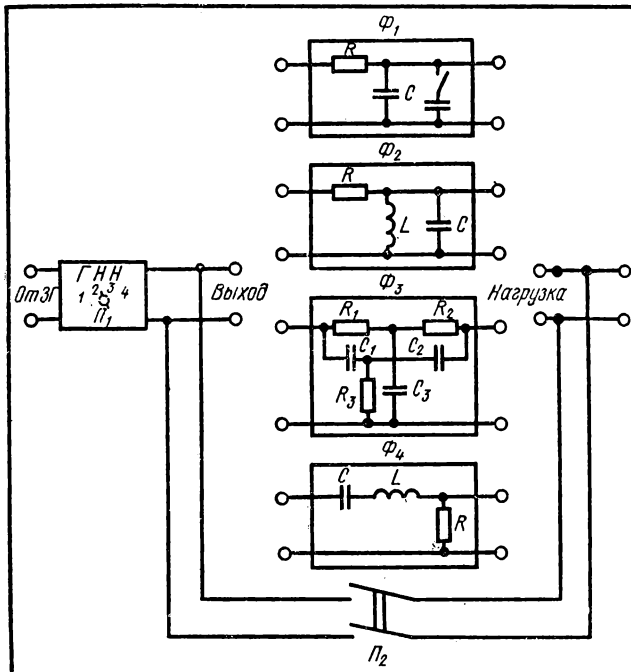


Рис. 9.1

включения напряжения нужной формы и спектра служит переключатель  $\Pi_1$ .

На рис. 9.1 изображен внешний вид лицевой стороны переносной панели с графическим изображением электрических схем четырех полюсников, подводящих проводов, с гнездами и ручками переключателей.

Объекты исследования: фильтр нижних частот (рис. 9.2, а); фильтр полосовой (рис. 9.2, б, в); фильтр заградительный (рис. 9.2, г).

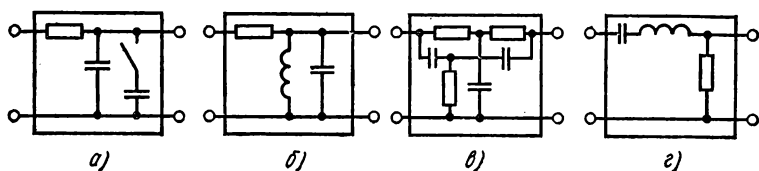


Рис. 9.2

На столе стенда расположены звуковой генератор ЗГ-36 и осциллограф С1-68. Для получения напряжения сложной формы ко входу преобразователя напряжения подключается генератор звуковой частоты ЗГ-36, ручками которого регулируется частота и напряжение преобразователя ГНН. На выходе ГНН можно получить (изменяя положение переключателя  $\Pi_1$ ) напряжения трех различных форм (рис. 9.3).

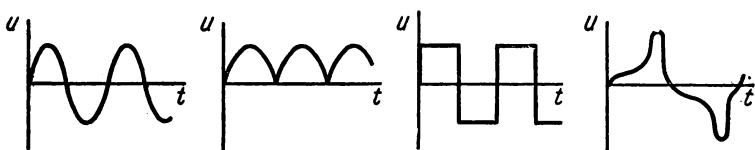


Рис. 9.3

Аналитическими выражениями для этих сложных напряжений будут соответственно:

$$1. u = U_m \frac{4}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t + \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t \dots \right),$$

$$2. u = U_m \frac{4}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t \dots \right),$$

$$3. u = U_m \sin \omega t + \frac{1}{4} \sin 3\omega t \dots$$

Для визуального наблюдения форм этих напряжений служит осциллограф С1-68, подключаемый к выходу ГНН.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Определить экспериментальным путем амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) всех электрических фильтров, установленных на лабораторном стенде, при воздействии на вход гармонического напряжения с постоянной амплитудой  $U_m = 10$  В.

По данным эксперимента построить амплитудно-частотные характеристики и определить по ним полосы пропускания, частоты резонанса (подавления) и назначение исследуемого фильтра.

Номер варианта	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Номер сложного напряжения	1	2	3	1	2	3	1	2
Частота основной гармоники, Гц	50	100	150	150	50	100	100	150

3.2. Для варианта, указанного преподавателем, в координатах полученных графиков построить диаграмму амплитудно-частотного спектра выходного напряжения по заданному гармоническому составу сигнала на входе фильтра.

3.3. Подать напряжение исследуемой формы (в п. 3.2) поочередно на входы фильтров и, используя осциллограф, зарисовать формы кривых напряжения на выходе фильтров.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Изучить материал о свойствах реактивных элементов (конденсаторов, индуктивных катушек), изменении сопротивления с изменением частоты напряжения питания [1, § 7.2; 7.3; 7.9], электрических фильтрах и их классификации, АЧХ фильтров и спектральных диаграммах сложных сигналов [1, § 9.4; 9.5; 9.6].

4.2. Руководствуясь п. 3.1 рабочего задания, указать места включения измерительных приборов для снятия АЧХ фильтров.

4.3. Составить план проведения экспериментальной части п. 3.1 рабочего задания и составить таблицу для записи результатов измерений на выходе фильтра при изменении частоты входного сигнала.

4.4. Изучить материал приложения П. 9.1 и составить планы выполнения расчетно-графической части п. 3.1 и 3.2. Заготовить кальку для зарисовки изображений исследуемых напряжений сложной формы.

### V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. Для экспериментального исследования АЧХ фильтра на его вход подают гармонический сигнал от звукового генератора ЗГ-36. Напряжение на входе фильтра поддерживают неизменным (10 В) и

контролируют по стрелочному прибору, установленному на генераторе. Частоту гармонического сигнала плавно изменяет оператор. Прежде чем записать показания приборов, рекомендуется проследить изменение АЧХ во всем частотном диапазоне (начиная от самой низшей частоты шкалы частот ЗГ-36). Выходное напряжение фильтра измеряют по клеткам сетки на экране осциллографа (осциллограф имеет калиброванную развертку по амплитуде).

5.2. При построении графика АЧХ фильтра необходимо предварительно вычислить нормированный коэффициент передачи (см. приложение П9.1):

$$K_{отн} = K/K_0.$$

5.3. При выполнении п. 3.2 рабочего задания амплитуду каждой гармоники разложения нужно умножить на приведенный коэффициент передачи фильтра, взятый для данной частоты (гармоники).

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Что такое электрический фильтр?
- 6.2. Что такое комплексный коэффициент передачи фильтра?
- 6.3. Что такое АЧХ фильтра? Как ее выявить экспериментом? Какие параметры можно по ней определить?
- 6.4. Что такое относительный коэффициент передачи фильтра?
- 6.5. Что называют полосой пропускания фильтра и как ее оценивают?
- 6.6. Почему АЧХ фильтра снимают при гармоническом воздействии на входе?
- 6.7. Какую диаграмму называют амплитудно-частотным спектром сложного сигнала? Какую она содержит информацию о сигнале?
- 6.8. Как изобразить АЧХ фильтра и диаграмму амплитудно-частотного спектра сложного сигнала в одних координатах?
- 6.9. Как по заданным АЧХ фильтра и гармоническому составу сложного сигнала на входе фильтра построить диаграмму амплитудно-частотного спектра сигнала на выходе этого фильтра?
- 6.10. Как по заданным АЧХ фильтра и гармоническому составу сложного сигнала на выходе фильтра построить диаграмму амплитудно-частотного спектра сигнала на входе этого фильтра?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЕ

### П 9.1. Электрические фильтры

Электрическим фильтром называется устройство, обладающее избирательностью по отношению к сигналам различных частот.

Ограничимся рассмотрением пассивных фильтров, т. е. фильтров, не содержащих внутренних источников питания.

Основной характеристикой фильтра является его комплексный коэффициент передачи по напряжению  $\tilde{K}$ , под которым понимается отношение комплексных амплитуд напряжений на выходе  $\dot{U}_{2m}$  и входе  $\dot{U}_{1m}$  фильтра

$$\tilde{K} = \frac{\dot{U}_{2m}}{\dot{U}_{1m}} = K_u e^{j\varphi}.$$

Избирательные свойства фильтра определяют по его амплитудно-частотной характеристике.

Под амплитудно-частотной характеристикой понимают зависимость модуля комплексного коэффициента передачи фильтра  $K$  от частоты гармонического сигнала на входе фильтра.

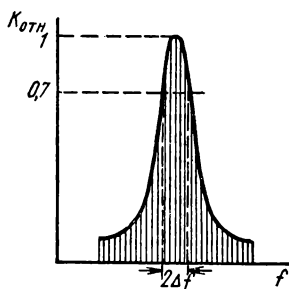


Рис. 9.4

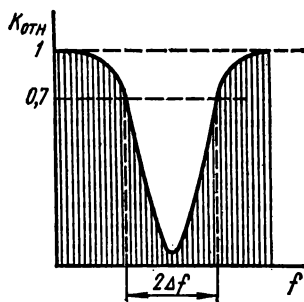


Рис. 9.5

При анализе свойств фильтра удобнее пользоваться зависимостью нормированного коэффициента передачи от частоты:  $K_{отн} = K/K_0$ , где  $K_0$  — максимальное значение модуля коэффициента передачи.

Из амплитудно-частотной характеристики может быть получен ряд параметров; одним из них является полоса пропускания  $2\Delta f$  (рис. 9.4, 9.5), в пределах которой модуль коэффициента передачи остается больше некоторого заданного значения  $K_n$ . Принято брать  $K_n = 0,7K_0$ . Фильтрующие свойства электрического фильтра проявляются наиболее сильно, если частота входного сигнала находится в полосе пропускания.

## Работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ С РЕЗИСТОРАМИ И КОНДЕНСАТОРАМИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с возможностью использования цепей с резисторами и конденсаторами в качестве параметрических регуляторов времени срабатывания электрических реле, а также в качестве составных элементов преобразователей постоянного напряжения в пилообразное напряжение.

Приобрести навыки применения электронного осциллографа для исследования и измерения параметров быстропеременных периодических несинусоидальных напряжений.

## II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследуются цепи, состоящие из регулируемых резисторов с угловыми перемещениями подвижных контактов, нерегулируемых резисторов и батареи конденсаторов со ступенчатым регулированием емкости, которые смонтированы на переносной панели, установленной на стенде. Для управления процессами в одной из них служит поляризованное реле (см. приложение П 10.1), а в другой — тиристор (см. приложение П 10.2), также укрепленные на панели.

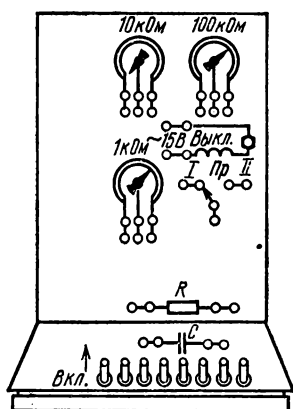


Рис. 10.1

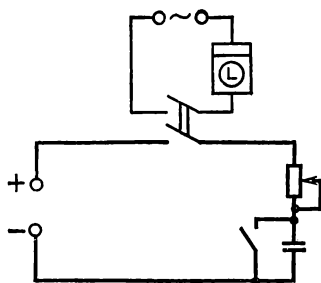


Рис. 10.2

На рис. 10.1 изображен внешний вид лицевой стороны переносной панели с условными символами укрепленных на ней устройств, схемой расположения гнезд их наружных выводов и ручек осей подвижных контактов резисторов, а также тумблеров в ветвях батареи конденсаторов.

Сопротивления обмоток регулируемых резисторов равны 1,10 и 100 кОм при мощности 1 Вт, а сопротивление нерегулируемого резистора  $R = 2,35$  мОм.

При поочередном включении тумблеров в ветвях батареи конденсаторов ее емкость может изменяться от 0,25 до 32 мкФ в шагом 0,25 мкФ.

Для измерения длительности различных стадий переходного процесса в цепи с большой постоянной времени на стенде установлен электрический секундомер (см. приложение П 10.3) с двухполюсным переключателем, а для исследования быстропеременных процессов — электронный осциллограф.

Для измерения других величин, предусмотренных рабочим заданием, на приборном щите стенда расположены многопредельные миллиамперметр (пределы измерения 3; 15; 75; 300; 750 мА, шкала имеет 100 делений) и вольтметр (пределы измерения 7,5; 15; 75; 150 В, шкала имеет 100 делений).

Исследуемые цепи рассчитаны на присоединение к источникам питания, один из которых допускает плавное регулирование создаваемого им постоянного напряжения, а другой — регулирование амплитуды синусоидального напряжения.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Собрать макет цепи управления электрического реле времени, содержащей конденсатор, постепенно заряжаемый от источника постоянного напряжения 140 В, и регулируемый резистор сопротивлением 100 кОм. Подвижный контакт резистора расположить примерно посередине между его крайними позициями.

При помощи электрического секундомера, включаемого и отключаемого одновременно с замыканием и размыканием исследуемой цепи (рис. 10.2), измерить промежутки времени, необходимые для уменьшения тока в цепи до значений, составляющих 40, 30, 20 и 10% от тока, возникающего в ней в первый момент после коммутации. Установить зависимость между этими величинами сначала при емкости конденсатора в 25 мкФ, а затем 32 мкФ.

По данным экспериментов построить графики нарастания напряжения на конденсаторах и определить, через какие интервалы времени после начала их заряда эти напряжения достигнут величины 50 В.

3.2. Собрать макет релейного преобразователя постоянного напряжения в пилообразное напряжение экспоненциальной формы, схема соединения элементов которого изображена на рис. 10.3. Установить на входе преобразователя постоянное напряжение величины 75 В.

Обмотку поляризованного реле присоединить к выводам источника питания, создающего переменное напряжение с действующим значением 15 В при частоте 50 Гц.

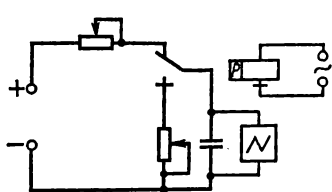


Рис. 10.3

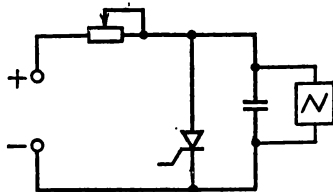


Рис. 10.4

Для ограничения зарядного тока конденсатора использовать регулируемый резистор сопротивлением 10 кОм, а для ограничения разрядного тока — регулируемый резистор сопротивлением 1 кОм, соединив их по схеме реостата и установив подвижные контакты примерно посередине между крайними позициями.

При помощи осциллографа измерить перепад напряжения на конденсаторе емкостью 2 мкФ, а также длительности заряда и разряда конденсатора в каждом цикле изменения его напряжения.

3.3. Собрать макет автогенератора пилообразного напряжения, содержащий источник постоянного напряжения 75 В и элементы, соединенные в соответствии со схемой рис. 10.4.

Включить в цепь тиристор, конденсатор емкостью 0,5 мкФ, регулируемый резистор сопротивлением 1 кОм, расположив его подвижный контакт примерно посередине между крайними позициями.

Осуществить осциллографическое исследование влияния сопротивления регулируемого резистора и емкости конденсатора на форму и частоту автоколебаний напряжений на конденсаторе, зарисовав соответствующие осциллограммы.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Руководствуясь п. 3.1 рабочего задания, выбрать требуемые пределы измерений и указать места включения миллиамперметра и вольтметров в цепь схемы рис. 10.2. Составить таблицу цен делений всех многопредельных приборов, используемых в работе.

4.2. Изучить § 8.3 в [1] и по заданным параметрам элементов цепи, собираемой согласно схеме рис. 10.2, оценить, через какой промежуток времени после начала коммутации прекратится ток в конденсаторе.

4.3. Составить план проведения экспериментальной части задания 3.1 и составить таблицу для записи результатов измерений тока заряда конденсатора и промежутков времени, отсчитываемых по электрическому секундомеру.

4.4. Ознакомиться с решением задач 8.3 и 8.13 в [2], изучить приложение П 10.4 и составить планы выполнения расчетно-графической части задания 3.1.

4.5. Руководствуясь приложением П 10.5, составить план проведения эксперимента, обеспечивающего возможность построения масштабной сетки, необходимой при осциллографических измерениях величин, предусмотренных п. 3.2 рабочего задания.

Заготовить соответствующую таблицу для записи результатов измерений и кальку для зарисовки изображений исследуемых импульсов напряжений на экране осциллографа.

4.6. По материалу § 8.3 в [1] ознакомиться с принципом действия простейшего автогенератора пилообразного напряжения с неоновой лампой и, руководствуясь приложением П 10.2, объяснить принцип действия устройства, исследуемого в соответствии с п. 3.3 рабочего задания.

4.7. Составить план проведения эксперимента, предусмотренного п. 3.3 рабочего задания.



## **У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. При выполнении экспериментальной части п. 3.1 рабочего задания целесообразно сначала измерить ток в исследуемой цепи (см. рис. 10.2) при замкнутом накоротко конденсаторе.

5.2. Кривые изменения во времени напряжений на конденсаторах, определенные при обработке результатов измерений в соответствии с п. 3.1 рабочего задания, построить на отдельных графиках.

5.3. Прежде чем приступить к выполнению экспериментальной части п. 3.2 и 3.3 рабочего задания, следует на экране осциллографа получить изображения нескольких кривых синусоидальных напряжений стандартной частоты с известными амплитудами, что позволит построить сетку с масштабными делениями по осям напряжения и времени, необходимую при обработке всех осциллограмм, снятых в соответствии с рабочим заданием.

5.4. При изменении положения подвижного контакта регулируемого резистора в цепи автогенератора пилообразного напряжения (см. рис. 10.4) для получения устойчивого изображения на экране осциллографа необходимо соответственно изменить частоту генератора развертки осциллографа.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. По какому закону изменяется во времени ток, возникающий в неразветвленной цепи с резистором, конденсатором и источником постоянной э. д. с. после замыкания цепи? Как измерить величину тока, созданного в первый момент после замыкания этой цепи?

6.2. Какую величину называют постоянной времени неразветвленной цепи с резистором и конденсатором?

6.3. Через какой промежуток времени практически завершается разряд конденсатора емкостью  $C$  через резистор сопротивлением  $R$ ?

6.4. Как определить постоянную времени цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора по заданному графику изменения во времени напряжения на конденсаторе в процессе его разряда?

6.5. Какие процессы совершаются в цепи релейного преобразователя постоянного напряжения в пилообразное напряжение экспоненциальной формы, собранного в соответствии со схемой рис. 10.3?

6.6. Какие процессы совершаются в цепи автогенератора пилообразного напряжения, собранного в соответствии со схемой рис. 10.4?

6.7. Каким экспериментом можно получить информацию, достаточную для построения масштабной сетки, необходимой при осциллографических измерениях параметров быстропеременных периодических несинусоидальных напряжений?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 10.1. Поляризованное реле

Поляризованное реле (рис. 10.5) состоит из постоянного магнита 1, магнитопровода 2 из магнитного материала, обмотки 3, якоря реле 4, подвижного 5 и неподвижных 6 контактов. В поляризованном реле результирующий магнитный поток определяется суммой магнитного потока постоянного магнита и потока обмотки электромагнита. В зависимости от направления тока в обмотке реле его якорь будет замыкать правый или левый неподвижный контакт. Если к обмотке реле подведено переменное напряжение частотой 50 Гц, то левый и правый контакты будут замыкаться попеременно с частотой 50 Гц.

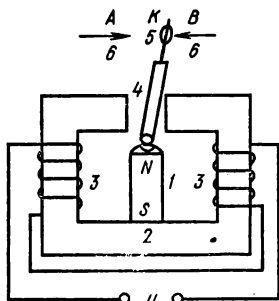


Рис. 10.5

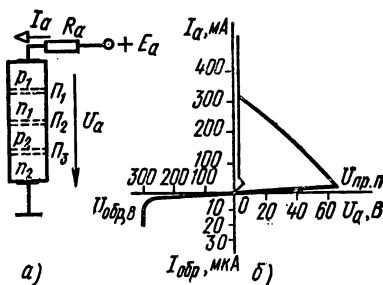


Рис. 10.6

### П 10.2. Тиристор

Тиристором называется четырехслойный полупроводниковый прибор с тремя *p-n*-переходами  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  (рис. 10.6,а).

Напряжение питания подается на тиристор таким образом, что переходы  $P_1$  и  $P_3$  открыты, а переход  $P_2$  закрыт. Сопротивления открытых переходов незначительны, поэтому почти все напряжение питания  $U_a$  приложено к закрытому переходу  $P_2$ , имеющему высокое сопротивление. Следовательно, ток тиристора мал.

При повышении напряжения  $U_a$  ток тиристора увеличивается незначительно, пока напряжение  $U_a$  не приблизится к некоторому критическому значению  $U_{пр.п}$  — напряжению прямого пробоя (рис. 10.6,б). После этого происходит лавинообразное увеличение числа носителей заряда за счет лавинного увеличения носителей в переходе  $P_2$  движущимися электронами. С увеличением числа носителей заряда ток в переходе  $P_2$  быстро нарастает, падение напряжения на резисторе  $R_a$  увеличивается, напряжение на тиристоре падает.

Процесс лавинообразного увеличения числа носителей заряда завершается пробоем перехода  $P_2$ . После пробоя напряжение на тиристоре снижается до значения порядка  $0,5 \div 1$  В. При дальнейшем увеличении э. д. с. источника питания  $E_a$  или уменьшении сопротивления резистора  $R_a$  ток в тиристоре нарастает в соответствии с вертикальным участком вольт-амперной характеристики. Такой пробой не вызывает разрушения перехода  $P_2$ . Время восстановления сопротивления этого перехода после снятия питающего напряжения обычно составляет  $10 \div 30$  мкс.

### П 10.3. Электрический секундомер

Электрический секундомер представляет собой вибрационный прибор, состоящий из поляризованного реле и кинематического устройства. При наличии переменного тока частотой 50 Гц в обмотке 3 поляризованного реле (см. рис. 10.5)

якорь 4 колеблется между полюсами электромагнита с частотой 50 Гц. Колебания якоря приводят в движение кинематическое устройство, аналогичное часовому механизму. Система шестерен этого механизма подобрана таким образом, что одна из стрелок (большая) делает полный оборот за 1 с, а малая — за 10 с. Шкала большой стрелки секундомера имеет деления, соответствующие десяткам и сотым долям секунды, а шкала малой стрелки разделена на 10 делений по 1 с каждое. Секундомер снабжен специальным механизмом для возврата стрелок в начальное (нулевое) положение. Для подключения к напряжению сети на корпусе секундомера имеются соответствующие зажимы.

## П 10.4. О построении графика нарастания напряжения на конденсаторе по заданной экспоненте его тока

Как известно, связь между током  $i$  в конденсаторе и напряжением  $u_C$  на его зажимах определяется интегральным соотношением

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt.$$

При токе, убывающем по экспоненциальному закону

$$i = I_0 e^{-t/\tau},$$

напряжение между пластинами конденсатора будет изменяться также по экспоненциальному закону и с той же постоянной времени  $\tau$ , но не уменьшаться, а увеличиваться:

$$u_C = \frac{\tau}{C} I_0 (1 - e^{-t/\tau}) = U_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

Напомним, что одно из свойств убывающей экспоненциальной функции времени заключается в том, что разность двух ее значений, выраженных в долях большего из них и определенных для моментов времени, отделенных друг от друга одним и тем же интервалом  $\Delta t$ , является величиной постоянной и равной  $\gamma = 1 - e^{-\Delta t/\tau}$ . В частности, относительное уменьшение любого значения экспоненциальной функции на интервале времени  $\Delta t$ , численно равном постоянной времени  $\tau$  цепи, составляет величину  $\gamma = 0,63$ . Иначе говоря, значение функции в конце интервала  $\Delta t = \tau$  уменьшается до 0,37 от ее значения в начале этого интервала.

Отмеченное свойство убывающей экспоненциальной функции можно использовать для определения постоянной времени  $\tau$  цепи, схема которой изображена на рис. 10.2, по известному графику экспоненциальной зависимости тока от времени.

Соответствующие построения приведены на рис. 10.7, где изображены два вспомогательных прямоугольных треугольника, имеющие общий катет произвольной длины. Длина второго катета одного из треугольников принята за единицу. В другом — меньшем по размерам — прямоугольном треугольнике длина второго катета составляет 0,37 от длины катета большего по размерам треугольника.

Как видно из рис. 10.7,а, эти треугольники служат для деления любой ординаты графика экспоненциальной функции времени в отношении 0,63 к 0,37.

Способ определения постоянной времени  $\tau$ , равной интервалу времени  $\Delta t$ , на протяжении которого относительное уменьшение значений функций равно 0,63, понятен из рассмотрения изображенных на том же рисунке линий и стрелок.

После определения величины  $\tau$  можно при помощи таких же двух вспомогательных прямоугольных треугольников построить график нарастания напряжения на конденсаторе в процессе его заряда от источника постоянной э. д. с.

Соответствующие геометрические построения приведены на рис. 10.7,б и не требуют дополнительных пояснений.

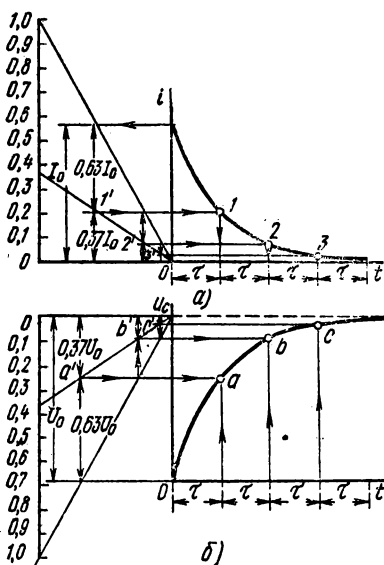


Рис. 10.7

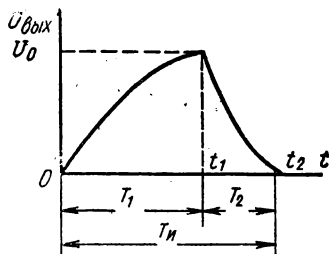


Рис. 10.8

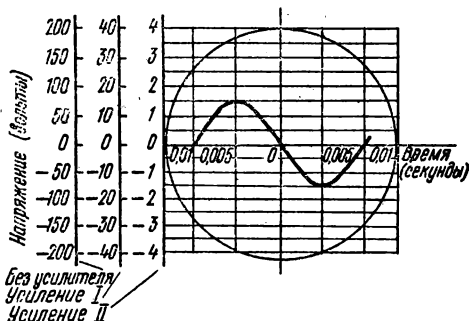


Рис. 10.9

## П 10.5. Методика осциллографического измерения параметров периодических несинусоидальных напряжений

Осциллографическое исследование быстропеременных периодических несимметричных напряжений дает возможность не только проследить ход исследуемого процесса во времени, но измерить любое мгновенное значение импульса напряжения или его длительность.

Так, например, для пилообразного напряжения (рис. 10.8) могут быть измерены перепад напряжения  $U_0$ , длительность  $T_1$  переднего фронта импульса (время подзаряда конденсатора), длительность  $T_2$  среза импульса (время частичного разряда конденсатора) и частота следования импульсов  $f = 1/T_n$ , где  $T_n$  — период импульса.

Для таких измерений необходимо построить градуированную масштабную сетку (рис. 10.9). В условиях лабораторной работы временной масштаб развертки и масштабы по осям напряжений калибруются посредством получения изображения на экране трубки синусоидальных напряжений с известными амплитудами и периодом. При этом для получения масштабов по нескольким осям напряжений ручка регулировки усиления осциллографа ставится в положение, соответствующее величине амплитуды.

## Работа № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОПРОВОДА ДРОССЕЛЯ НА ВЕЛИЧИНУ И ФОРМУ ТОКА В ОБМОТКЕ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать влияние магнитопровода, воздушного зазора дросселя и напряжения источника питания на величину и форму тока в обмотке, а также на параметры дросселя.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе изучаются два дросселя и индуктивная катушка. Обмотки дросселей выполнены из круглого медного провода марки ПЭЛ диаметром 0,44 мм. Число витков каждой обмотки  $\omega = 800$ .

Магнитопроводы дросселей выполнены шихтованными из пластин горячекатаной стали Э41 толщиной 0,35 мм. Размеры магнитопроводов одинаковы:  $a = 12$  мм,  $b = 11$  мм,  $h = 30$  мм,  $c = 16$  мм. Коэффициент заполнения сердечника лаковой изоляцией между пластинами  $k_c = 0,92$ . Сердечник одного из дросселей имеет поперечный зазор — прокладку из немагнитного материала толщиной 0,5 мм. На рис. 11.1 изображен эскиз магнитопровода, а на рис. 11.2 — внешний вид лицевой стороны переносной панели.

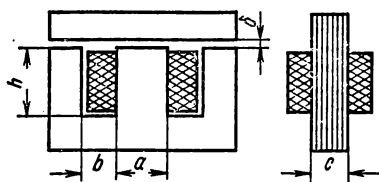


Рис. 11.1

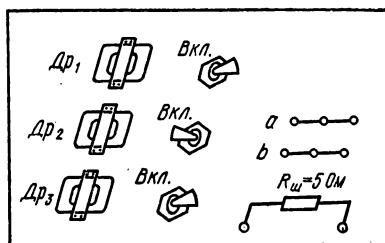


Рис. 11.2

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, на приборном щите стенда имеются многопредельные миллиамперметр (пределы измерения 15; 30; 75; 300; 750; 1500 мА) и вольтметр (пределы измерения 7,5; 15; 75; 150 В), а на столе стенда установлен осциллограф. Исследуемая цепь присоединяется к источнику питания, допускающему плавное регулирование амплитуды создаваемого им напряжения.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Выявить вольт-амперные характеристики двух одинаковых катушек, расположенных на замкнутом и разомкнутом стальных магнитопроводах, а также вольт-амперную характеристику катушек без стального магнитопровода.

3.2. Экспериментально определить номинальные напряжения на катушках, руководствуясь тем, что при этих напряжениях плотность тока в катушках достигает предельно допустимой величины (по условиям нагрева), которую принять равной 3 А/мм.

3.3. На основании вольт-амперных характеристик трех катушек, построенных по данным п. 3.1, определить:

а) ток в катушке дросселя с замкнутым магнитопроводом при напряжении, равном номинальному напряжению дросселя с разомкнутым магнитопроводом;

б) индуктивность катушки без стального магнитопровода и эквивалентные индуктивности катушек дросселей при двух значениях тока:  $I = I_{\text{доп}}$  и  $I = 0,5 I_{\text{доп}}$ ;

в) амплитуды магнитной индукции в замкнутом и разомкнутом магнитопроводах дросселей при номинальных напряжениях на катушках.

3.4. Исследовать влияние магнитопровода и воздушного зазора дросселя, а также напряжения источника питания на форму кривой тока дросселя и индуктивной катушки.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Руководствуясь п. 3.1 рабочего задания, начертить схему цепи со всеми необходимыми измерительными приборами. Рассчитать предельно допустимый ток в обмотке катушки [1, § 3.2] и указать на схеме рабочий предел измерения миллиамперметра. Составить таблицу для записи величин, предусмотренных рабочим заданием.

4.2. Руководствуясь решением задач 10.4 и 10.12 [2], написать формулы для расчета эквивалентной индуктивности дросселя и амплитуды магнитной индукции в магнитопроводе. Рассчитать сечение среднего стержня магнитопровода.

4.3. Записать порядок проведения эксперимента в соответствии с п. 3.4 рабочего задания.

### V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. При выполнении опытов ток в обмотке катушки не должен превышать допустимого значения, рассчитанного в п. 4.1.

5.2. Для регистрации формы кривой тока в цепи с дросселем следует предусмотреть включение осциллографа по схеме рис. 11.3 ( $Y_1$  и  $Y_2$  — клеммы входа осциллографа).

5.3. При исследовании влияния магнитопровода на форму кривой тока сравните осциллограммы для дросселя с замкнутым магнитопроводом и для катушки без магнитопровода. Сначала, плавно изменяя напряжение на дросселе с замкнутым магнитопроводом, проследите, влияет ли величина напряжения на форму тока, а затем выясните, как она влияет на форму тока в катушке дросселя с разомкнутым сердечником.

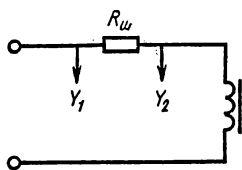


Рис. 11.3

5.4. Отчет должен содержать:

а) вольт-амперные характеристики дросселей и индуктивной катушки, построенные на одном графике;

б) расчетные данные по п. 3.3 рабочего задания (рекомендуется свести эти данные в общую таблицу);

в) подробный вывод о влиянии магнитопровода и воздушного зазора дросселя, а также напряжения источника питания на величину эквивалентной индуктивности катушек и форму тока в обмотке.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Для чего магнитопровод дросселя выполняют из электротехнической стали, а не из ферромагнитного материала?

6.2. Для чего магнитопровод дросселя собирают из отдельных тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали?

6.3. Как зависит амплитуда магнитной индукции основного поля в магнитопровode дросселя от амплитуды и частоты напряжения на зажимах его обмотки?

6.4. Как изменится действующее значение тока в обмотке дросселя при увеличении поперечного зазора в магнитопровode и неизменной амплитуде напряжения на зажимах обмотки?

6.5. Почему понятие «индуктивное сопротивление обмотки» неприменимо к реальному дросселю со стальным магнитопроводом?

6.6. Какую величину называют «эквивалентным индуктивным сопротивлением обмотки» реального дросселя со стальным магнитопроводом?

6.7. Как определить эквивалентное индуктивное сопротивление обмотки дросселя с учетом потерь на перемагничивание магнитопровода и на нагрев обмотки?

6.8. Как по заданной осциллограмме несинусоидального тока в обмотке дросселя определить амплитуду его эквивалентного синусоидального тока?

6.9. Как определить параметры схемы замещения дросселя?

## Работа № 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РОДА НАГРУЗКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать влияние резистивной, индуктивной и емкостной нагрузок на ток первичной обмотки и внешние характеристики трансформатора.

Изучить рабочие свойства трансформатора при автотрансформаторном включении.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования используется силовой трансформатор, условное обозначение которого приведено на рис. 12.1. Основные технические характеристики трансформатора: мощность 150 ВА, частота 50 Гц. Ток холостого хода первичной (I) обмотки: при включении на 127 В  $\leq 0,55$  А, при включении на 220 В  $\leq 0,35$  А. Ток первичной (I) обмотки под нагрузкой: при включении на 127 В  $\leq 1,45$  А, при включении на 220 В  $\leq 0,84$  А. Напряжение и ток вторичной (II) обмотки под нагрузкой:  $7 \pm 0,12$  В;  $\leq 0,6$  А. Пластины Ш-30. Сталь Э320 - 0,35 мм. Числа витков обмоток:  $\omega_1 = 306$ ,  $\omega_2 = 280$ ,  $\omega_3 = 17$ .

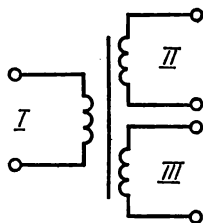


Рис. 12.1

В качестве нагрузок служат индуктивная катушка (дроссель 1УБИ-80/220 НП), регулируемые резисторы (ПЭВ-100-150 Ом, ППБ-25-150 Ом, ПЭВ-5-5 Ом) и батарея конденсаторов (МБГО-1—32 - 160). Все эти устройства смонтированы на переносной панели, установленной на столе.

Лицевая сторона переносной панели с условными графическими обозначениями перечисленных устройств, схемой расположения наружных выводов концов каждого из них и осей подвижных контактов резисторов, а также тумблеров батареи конденсаторов изображена на рис. 12.2.

При помощи тумблеров емкость батареи конденсаторов может быть изменена от 1 до 64 мкФ. Номинальный ток индуктивной катушки 0,85 А.

Для осциллографирования тока холостого хода трансформатора используется осциллограф С1-19 с коммутатором, позволяющий одно-



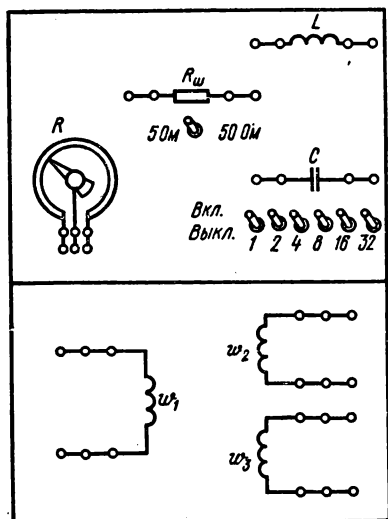


Рис. 12.2

временно наблюдать форму первичного напряжения и тока. С этой целью резистор сопротивлением  $r = 5$  Ом включается в цепь первичной обмотки по схеме рис. 12.3.

Для выполнения рабочего задания на столе стэнда имеется ваттметр Д539 с двумя пределами измерения по току (0,5 и 1,0 А) и четырьмя пределами измерения по напряжению (30; 75; 150; 300 В), а на приборном щите — три многопредельных миллиамперметра Э377 (300; 750; 1500 мА) и многопредельный вольтметр Э377 (15; 75; 150 В). В работе используется источник синусоидального напряжения с  $U = 150$  В и  $I_{\text{доп}} = 2$  А.

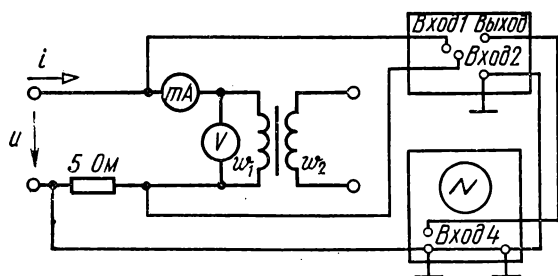


Рис. 12.3

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода трансформатора при номинальном напряжении на первичной обмотке. Снять осциллограмму тока холостого хода и измерить его величину. Определить параметры  $r_0$ ,  $L_0$  схемы замещения.

3.2. Осуществить режим короткого замыкания при номинальном токе во вторичной обмотке трансформатора. Определить параметры  $r_K$ ,  $L_K$  схемы замещения.

3.3. Осуществить режим нагрузки при включении трансформатора сначала на индуктивную катушку, затем на резистор и конденсатор. Построить внешние характеристики трансформатора.

3.4. Осуществить автотрансформаторное включение трансформатора при согласном включении его обмоток. Измерить ток холостого хода и построить внешнюю характеристику для резистивной нагрузки.

#### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Руководствуясь материалом гл. 13[1], составить схему включения измерительных приборов, предусмотренных п. 3.1, 3.2 рабочего задания. Около символов приборов проставить конечные значения шкал.

4.2. Руководствуясь решением задач 10.14, 10.15 [2], записать формулы для расчета параметров схем замещения по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

4.3. Составить полный перечень операций и указать требуемую их последовательность при выполнении каждого этапа рабочего задания.

4.4. Заготовить таблицы для записи показаний приборов по каждому этапу рабочего задания, а также миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями, снабженными масштабными осями и числовыми отметками откладываемых величин.

#### V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. При проведении опыта короткого замыкания необходимо плавно повышать напряжение на первичной обмотке до величины, соответствующей номинальному току во вторичной обмотке.

5.2. Для выявления внешних характеристик трансформатора вначале следует подключить к обмотке  $w_2$  дроссель и измерить величину тока  $I_2$ , затем установить ту же величину тока  $I_2$  при подключении резистора и конденсатора.

5.3. При выполнении п. 3.4 рабочего задания нужно помнить о том, что возможны два способа включения обмоток: согласное и встречное (рис. 12.4).

При согласном включении приложенное напряжение  $u_1$  уравнивается суммой наведенных э. д. с. в обмотках  $w_1$  и  $w_2$ , так как ток  $i_1$  имеет одинаковое направление относительно одноименных зажимов.

При встречном включении приложенное напряжение  $u_1$  уравнивается разностью наведенных э. д. с. в обмотках  $w_1$  и  $w_2$ , так как ток  $i_1$  имеет разное направление относительно одноименных зажимов. В этом случае величина тока  $I_1$  может достигнуть больших значений. Поэтому при проведении этого опыта следует плавно повышать напряжение с помощью ЛАТРа, наблюдая за показаниями амперметра, вклю-

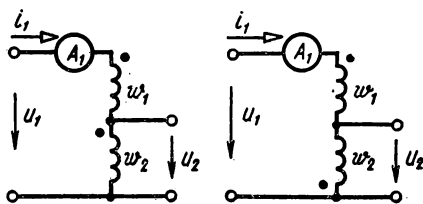


Рис. 12.4

ченного последовательно с обмотками. При резком увеличении тока необходимо немедленно снять напряжение, пересоединить вторичную обмотку и повторить опыт.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Для чего и как проводится опыт холостого хода?
- 6.2. Для чего и как проводится опыт короткого замыкания?
- 6.3. Почему форма тока в первичной обмотке отличается от синусоидальной при номинальном напряжении?
- 6.4. Что называют внешней характеристикой трансформатора?
- 6.5. Какое влияние оказывает род нагрузки на вид внешней характеристики трансформатора?
- 6.6. Изобразите вид Г-образной схемы замещения трансформатора и укажите способы экспериментального определения ее параметров.
- 6.7. Каким способом можно определить, согласно или встречно соединены обмотки трансформатора при автотрансформаторном включении?
- 6.7. В каких случаях применяют автотрансформаторное включение обмоток трансформатора?

## Работа № 13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с методикой выявления внешних характеристик трехфазного трансформатора по данным его испытания в режимах холостого хода и короткого замыкания.

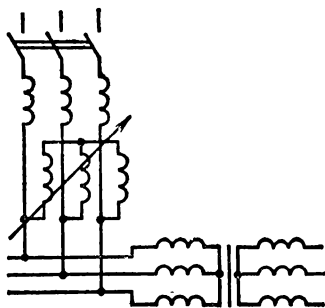


Рис. 13.1

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследуется трехфазный трансформатор 220/127 В мощностью 1000 ВА. Фазы первичной и вторичной обмоток соединены звездой. Для плавного изменения амплитуд трехфазной системы напряжений, действующих между выводами первичной обмотки трансформатора, на стенде установлен трехфазный поворотный автотрансформатор (рис. 13.1). На стенде имеются два ампер-

метра (пределы измерения 0,5 и 5 А), два вольтметра (пределы измерения 15 и 150 В), два трехфазных ваттметра, рассчитанные на включение в сети с напряжениями 220 и 15 В.

### **III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ**

3.1. Осуществить режим холостого хода трехфазного трансформатора, установить зависимость тока в фазе первичной обмотки и мощности магнитных потерь от фазного напряжения. Определить отношение чисел витков фаз первичной и вторичной обмоток.

3.2. Осуществить режим короткого замыкания фаз вторичной обмотки, установить зависимость суммарной мощности электрических потерь трансформатора от тока в фазе первичной обмотки.

3.3. По опытным данным, полученным при испытании трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания, рассчитать параметры его Г-образной схемы замещения, построить внешние характеристики трансформатора при резистивно-индуктивной и резистивно-емкостной нагрузках с коэффициентом мощности 0,8.

### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Составить схему включения трансформатора и измерительных приборов, необходимых при его испытании в режиме холостого хода, а также соответствующую этому режиму схему замещения. Около символов приборов проставить предельные значения шкал.

4.2. Выписать формулы для расчета отношения чисел витков фаз обмоток и параметров схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода по показаниям измерительных приборов, включенных в соответствии со схемой п. 4.1.

4.3. Составить схему включения трансформатора и измерительных приборов, необходимых при его испытании в режиме короткого замыкания, а также соответствующую этому режиму схему замещения. Около символов приборов проставить предельные значения шкал.

4.4. Составить расчетную таблицу для определения параметров схемы замещения трансформаторов в режиме короткого замыкания по показаниям приборов, включенных в соответствии со схемой п. 4.3.

4.5. Изобразить Г-образную схему замещения трансформатора в режиме нагрузки.

4.6. По номинальным данным трансформатора рассчитать величины номинальных токов в фазах первичной и вторичной обмоток.

4.7. Руководствуясь Г-образной схемой замещения трансформатора, составить формулы для расчета изменения вторичного напряжения, вызванного увеличением тока в резистивно-индуктивном (или в резистивно-емкостном) приемнике при неизменной величине коэффициента мощности приемника.

4.8. Составить подробный перечень операций по осуществлению п. 3.1 и 3.2 рабочего задания.

4.9. Составить таблицы для записи показаний измерительных приборов при испытании трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания.

4.10. Подготовить миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями и масштабными делениями для построения графиков, предусмотренных рабочим заданием.

## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Перед включением в сеть поворотного автотрансформатора его ротор следует расположить так, чтобы стрелка указания положения установилась у числовой отметки «0» на шкале автотрансформатора.

5.2. Для плавного повышения напряжения на фазах первичной обмотки трансформатора ротор автотрансформатора поворачивают вручную. При испытании трансформатора в режиме холостого хода необходимый угол поворота ротора определяют, руководствуясь показаниями вольтметров, а в режиме короткого замыкания — показаниями амперметров.

5.3. Перед включением вольтметров, амперметров и ваттметра в цепи обмоток исследуемого трансформатора проверьте соответствие ожидаемых величин напряжений и токов в режимах холостого хода и короткого замыкания с предельно допустимыми для каждого прибора величинами напряжений или токов. Убедитесь в том, что для испытания трансформатора в режиме холостого хода необходим один комплект приборов, а в режиме короткого замыкания — иной.

5.4. При расчете параметров схемы замещения трансформатора следует учесть, что ваттметр измеряет суммарную активную мощность трехфазного трансформатора в целом, а схема замещения относится только к одной его фазе.

5.5. Внешние характеристики трансформатора постройте в относительных единицах, приняв за базовую величину напряжения на нагрузке напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода, а за базовую величину тока в нагрузке — номинальный ток вторичной обмотки.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Какие параметры Г-образной схемы замещения трансформатора могут быть определены по данным его испытания в режиме холостого хода и короткого замыкания?

6.2. Каким экспериментом можно определить отношение чисел витков фаз первичной и вторичной обмоток трансформатора?

6.3. Почему ваттметр в цепи первичной обмотки трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке практически измеряет мощность магнитных потерь?

6.4. Почему в режиме холостого хода трансформатора его магнитопровод нагревается, а обе обмотки остаются холодными?

- 6.5. Почему в режиме короткого замыкания трансформатора обе его обмотки нагреты, а магнитопровод остается холодным?
- 6.6. Почему ток холостого хода трансформатора значительно меньше номинального тока?
- 6.7. Почему в опыте короткого замыкания трансформатора значительно снижают напряжения на фазах первичной обмотки?
- 6.8. Почему ваттметр в цепи первичной обмотки трансформатора при коротком замыкании вторичной обмотки практически измеряет мощность электрических потерь трансформатора?
- 6.9. Как будет изменяться напряжение на вторичной обмотке трансформатора с увеличением тока в ней при резистивно-индуктивной нагрузке?
- 6.10. Как будет изменяться напряжение на вторичной обмотке трансформатора с увеличением тока в ней при емкостной нагрузке?

## Работа № 14

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ СВОЙСТВ ДРОССЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться со схемой простейшего МУ с выходом на постоянном токе. Ознакомиться с реальными элементами МУ.

Определить основные характеристики МУ и их параметры. Определить влияние величин напряжения питания, сопротивления нагрузки и числа витков дросселя на характеристики МУ.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема расположения основных элементов МУ дана на панели (рис. 14.1).

Здесь: ТУМ — дроссель магнитного усилителя;  $Dp_y$  — дроссель цепи управления;  $B_1, B_2$  — выпрямители мостового типа;  $R_1, R_2$  — магазины резисторов;  $R_3$  — резистор переменного сопротивления.

Дроссель магнитного усилителя (ТУМ) — стандартный, типа ТУМ-АЗ-11, установлен на наклонной панели стенда, состоит из двух кольцевых ферромагнитных сердечников, на которые намотаны 7 обмоток управления и две пары рабочих обмоток (рис. 14.2). Рабочие обмотки  $A1-X1, A2-X2$  и  $B1-Y1, B2-Y2$  охватывают по одному сердечнику соответственно, а обмотки управления  $1H-1K \div 7H-7K$  — оба сердечника вместе. Рабочие обмотки находятся внутри, обмотки

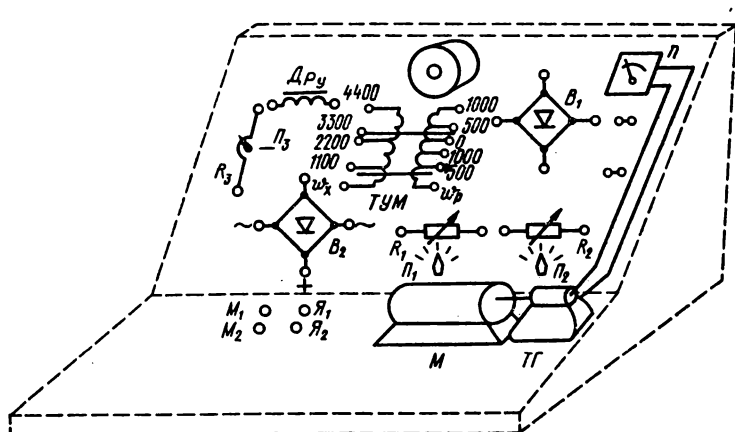


Рис. 14.1

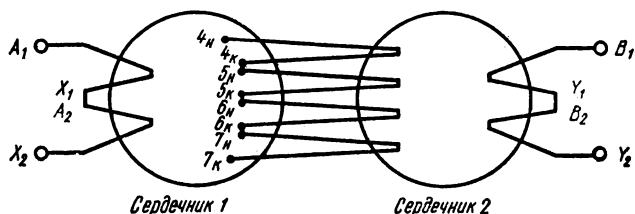


Рис. 14.2

управления — снаружи. Концы обмоток выведены на клеммную панель из пластмассы. Буквы *H* и *K*; *A* и *X*, *B* и *Y* обозначают соответственно начало и конец обмотки. Основные данные обмоток приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Наименование параметров	Обозначение обмоток										
	A1-X1	A2-X2	B1-Y1	B2-Y2	1H-1K	2H-2K	3H-3K	4H-4K	5H-6K	6H-6K	7H-7K
Число витков	500	500	500	500	30	400	1400	1100	1100	1100	1100
Сопротивление, Ом	3,64	3,64	3,64	0,39	60	204	168	168	125	125	25
Диаметр провода по меди, мм	0,44	0,44	0,44	0,57	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18	0,18	0,13

В работе используются только четыре обмотки управления 4H-4K ÷ 7H-7K. Обмотки соединены последовательно и согласно. Клеммы 4H, 5H, 6H, 7H и 7K соединены с гнездами на панели стенда, обозначенными соответственно 4400, 3300, 2200, 1100 и 0 по числу витков обмотки управления  $\omega_y$  между клеммами 4H, 5H, 6H, 7H и 7K.

Рабочие обмотки на каждом сердечнике соединены последовательно и согласно (см. рис. 14.2). Клеммы  $A_1$ ,  $A_2$  и  $X_2$ , а также  $B_1$ ,  $B_2$  и  $Y_2$  соединены с гнездами на панели стенда, обозначенными соответственно 1000, 500 и 0 по числу витков рабочей обмотки между клеммами  $A_1$ ,  $A_2$  и  $X_2$ , а также между клеммами  $B_1$ ,  $B_2$  и  $Y_2$ . Электрическая схема ТУМ, необходимая в данной работе, показана на панели стенда.

Дроссель цепи управления  $Dr_y$  состоит из Ш-образного ферромагнитного сердечника с зазором, на котором намотана обмотка. Величина индуктивности дросселя 20 Г.

Дроссель  $Dr_y$  установлен за панелью стенда. На панели находятся только гнезда, которые соединены с концами обмотки дросселя, и изображена схема. Схема одного из выпрямителей дана на рис. 14.3. Полупроводниковые диоды  $D_1 \div D_4$  типа Д7Е. Зажимы  $\sim$  служат для соединения выпрямителя с источником переменного сигнала. Выпрямленное напряжение получается между зажимами, обозначенными «+» и «-». Обозначения «+» и «-» указывают на полярность получаемого напряжения. Выпрямители установлены за панелью. На наклонной панели находятся гнезда, соединенные с соответствующими зажимами выпрямителя, и схема.

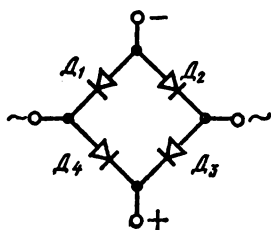


Рис. 14.3

Магазины резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , смонтированные за панелью стенда, служат в качестве нагрузки  $H$ . Они состоят из переключателей  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  и резисторов, включенных по схеме рис. 14.4. Переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  на 5 положений. Выводы резисторов  $R_1$  и  $R_2$  соединены с гнездами на наклонной панели, имеющими аналогичные обозначения.

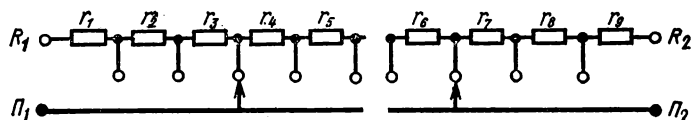


Рис. 14.4

Резистор переменного сопротивления  $R_3$  установлен на наклонной панели. Ось ротора подвижного контакта вращается с помощью ручки переключателя  $\Pi_3$ . Выводы резистора  $R_3$  соединены с гнездами по схеме, показанной на наклонной панели (см. рис. 14.1),  $R_3 = 1000$  Ом.

Нагрузкой МУ может быть обмотка возбуждения микродвигателя. На панели:  $M$  — микродвигатель постоянного тока типа СЛ-221, установлен на горизонтальной панели стенда под прозрачным колпаком. Вал двигателя соединен с валом тахогенератора ТГ. Концы обмотки возбуждения  $M_1$  и  $M_2$ , а также выводы якостей  $Y_1$  и  $Y_2$  соединены с гнездами на панели стенда, имеющими аналогичные обозначения. Электрическая схема двигателя показана на наклонной панели; ТГ—



тахогенератор, установлен вместе с микродвигателем на горизонтальной панели стенда под прозрачным колпаком. Выход тахогенератора подключен к магнитоэлектрическому измерителю. На наклонной панели показана только схема соединения  $TГ$  с этим измерителем и микродвигателем  $M$ ;  $n$  — указатель частоты вращения вала двигателя. Магнитоэлектрический измеритель с добавочным сопротивлением в цепи катушки установлен на наклонной панели.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Изучить свойства дросселя МУ как нелинейного электромагнитного элемента по семейству его ампер-вольтных характеристик (а. в. х.). Для этого: а) получить экспериментально семейство а. в. х., выражающих зависимость  $I_{cp}(U_{cp})$  при  $I_y = \text{const}$ ;

б) построить семейство полученных а. в. х., объяснить ход кривых.

3.2. Составить схему простейшего дроссельного МУ с выходом на постоянном токе и построить его расчетную характеристику вход—выход, принимая следующие исходные данные:

а) действующее значение напряжения питания усилителя 80 В;  
б) нагрузка — резистивный элемент с сопротивлением 2000 Ом;  
в) число витков рабочей обмотки 1000, управляющей обмотки 4400;

г) сопротивление цепи управления 600 Ом;

д) дроссель МУ имеет а. в. х., полученные в п. 3.1.

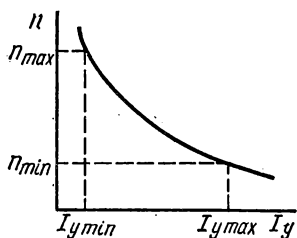


Рис. 14.5

3.3. Экспериментально исследовать МУ, включенный в соответствии с п. 3.2:

а) получить характеристику вход — выход и сравнить ее с расчетной;

б) определить по ней основные параметры МУ и границы линейного участка;

в) изучить влияние изменения величины напряжения питания и сопротивления нагрузки на основные параметры МУ и характеристику вход — выход;

г) уменьшить в два раза (по сравнению с полученным в п. 3.3б) коэффициент усиления МУ по току.

3.4. Включить микродвигатель постоянного тока, находящийся на стенде, в качестве нагрузки МУ (в соответствии со схемой п. 3.2) так, чтобы обеспечить управление частотой вращения его якоря согласно регулировочной характеристике (рис. 14.5).

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Изучить § 13.1; 13.2 в [1].

4.2. Подготовить протокол отчета, форма и содержание которого указаны во введении.

4.3. Начертить схему МУ с выходом на постоянном токе, имеющего двухсердечниковый дроссель.

4.4. Ознакомиться с графическим методом расчета нелинейных цепей — методом пересечений характеристик [1, § 4.2; 4.4 (пример)].

4.5. Составить план расчета характеристики вход — выход для принятой выше схемы МУ, считая семейство а. в. х. дросселя известным.

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Средние выпрямленные значения токов и напряжений регистрируются приборами выпрямительной (детекторной) или магнито-электрической системы и с помощью выпрямительных мостов  $B_1$  и  $B_2$ .

5.2. При получении семейства а. в. х. принять:

- а) число витков рабочей обмотки 1000;
- б) число витков обмотки управления 4400;
- в) максимальный ток управления не более 15 мА;
- г) максимальное среднее значение рабочего тока не более 50 мА, а напряжения на дросселе не выше 100 В.

5.3. Для построения характеристики вход — выход воспользоваться методом пересечений характеристик.

#### **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Каков принцип работы дроссельного МУ?

6.2. Объясните ампер-вольтные характеристики дросселя МУ.

6.3. Поясните метод построения характеристики вход — выход, применяемые в работе.

6.4. Какие параметры усилителя определяют коэффициенты усиления МУ по току, напряжению и мощности?

6.5. От чего зависят границы линейного участка характеристики вход — выход МУ?

6.6. Как изменяется характеристика вход — выход при изменении:

- а) напряжения питания;
- б) сопротивления нагрузки;
- в) числа витков обмотки управления или рабочей обмотки?

## Работа № 15

### ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить влияние способа соединения обмоток возбуждения и якоря на внешние характеристики генератора постоянного тока.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Приборная панель стенда с мнемонической схемой машин и пуско-регулирующих аппаратов изображена на рис. 15.1.

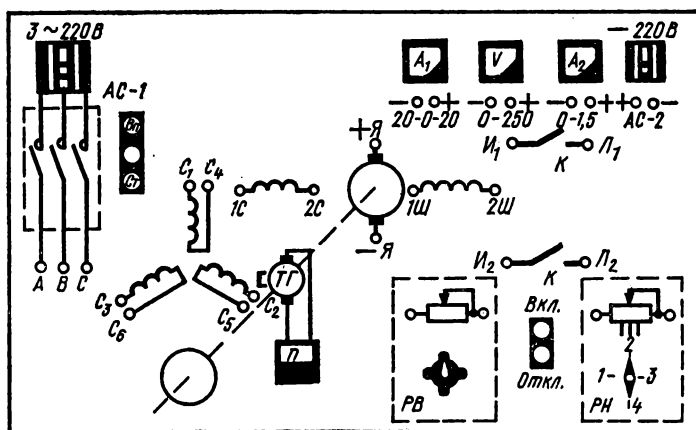


Рис. 15.1

В качестве генератора используется машина постоянного тока смешанного возбуждения типа П-32, предназначенная для работы в режиме двигателя. Поэтому данные заводской паспортной таблички этой машины не соответствуют ее генераторному режиму.

Якорь машины П-32 приводится во вращение трехфазным электрическим двигателем. Этот двигатель снабжен рабочей обмоткой, включаемой в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. На одних стендах установлены приводные двигатели типа АО42-4, на других — типа АК51-4.

Двигатели АО42-4 имеют трехфазную рабочую обмотку без внутреннего соединения отдельных фаз. Концы каждой фазы обмотки у них выведены на клеммный щиток и обозначены буквами  $C_1$  и  $C_4$ ,  $C_2$  и  $C_5$ ,  $C_3$  и  $C_6$ . На клеммном щитке выводы фаз обмотки следует зам-

кнуть друг с другом проводами таким образом, чтобы фазы обмотки были соединены треугольником.

Двигатели АК51-4 снабжены рабочей обмоткой, фазы которой соединены треугольником при изготовлении машины на заводе. Поэтому клеммный щиток этих двигателей имеет только три вывода, обозначенные буквами  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ .

Рабочую обмотку двигателя включают в трехфазную сеть с помощью установочного автомата АС-1. Для этого выводы автомата  $A$ ,  $B$  и  $C$  необходимо соединить с выводами  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  фаз обмотки. Для дистанционного включения и отключения трехфазной обмотки двигателя служит электромагнитный аппарат — контактор, управляемый кнопками «Вп» («Вперед») и «Ст» («Стоп»).

Скорректированные номинальные данные машины П-32 для генераторного режима при смешанном возбуждении представлены в табл. 15.1.

Таблица 15.1

Приводной двигатель		Машина П-32 в режиме генератора	
тип	частота вращения, об/мин	напряжение, В	ток, А
АО42-4	1420	180	10
АК51-4	1370	160	8

Нагрузкой генератора служит реостат нагрузки  $RH$ , состоящий из четырех секций, включаемых с помощью пакетного переключателя. Реостат нагрузки соединяют с зажимами якоря машины П-32 посредством вспомогательного контактора  $K$  при помощи кнопок «Вкл.» («Включено») и «Откл.» («Отключено»).

Основная обмотка возбуждения машины (параллельная или шунтовая) имеет выводы, обозначенные буквами  $1Ш$  и  $2Ш$ . Для регулирования тока в ней предусмотрен реостат  $PВ$  с подвижным контактом. При испытании машины в генераторном режиме с независимым возбуждением реостат  $PВ$  следует соединить по схеме потенциометра и включить в сеть постоянного напряжения 220 В посредством двухполюсного установочного автомата АС-2.

Вспомогательная обмотка возбуждения (последовательная, или серийная) имеет выводы, обозначенные  $1С$  и  $2С$ .

Частоту вращения якоря генератора измеряют магнитоэлектрическим тахогенератором  $ТГ$  и вольтметром со шкалой, имеющей числовые отметки, соответствующие числу  $n$  оборотов вала генератора в минуту.

На стенде имеются вольтметр на 250 В, амперметр на 1,5 А и амперметр с двусторонней шкалой на 20 А.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода генератора независимого возбуждения и определить зависимость величины э. д. с. обмотки якоря от тока возбуждения. Построить характеристику холостого хода.

3.2. Осуществить режим нагрузки генератора независимого возбуждения:

а) определить номинальный ток возбуждения;

б) поддерживая величину номинального тока возбуждения неизменной, определить зависимость напряжения на нагрузке от тока в обмотке якоря генератора; построить внешнюю характеристику и определить по ней эквивалентное внутреннее сопротивление обмотки якоря; оценить диапазон изменения напряжения;

в) установить, как следует изменять ток возбуждения, чтобы при изменении тока в цепи якоря напряжение между щетками генератора поддерживалось неизменным и равным номинальному; построить соответствующие внешнюю и регулировочную характеристики;

г) выявить внешнюю характеристику генератора при неизменном токе возбуждения, равном половине номинального.

3.3. Осуществить режим холостого хода генератора параллельного возбуждения:

а) установить, какое влияние на процесс самовозбуждения генератора оказывает перемена мест соединения концов обмотки возбуждения и щеток при неизменном направлении вращения якоря;

б) определить диапазон устойчивого регулирования напряжения генератора в режиме холостого хода, достигаемого изменением сопротивления реостата в цепи обмотки возбуждения при неизменной скорости вращения якоря;

в) установить, при каком токе в обмотке возбуждения напряжение генератора параллельного возбуждения в режиме холостого хода будет таким же, как и у генератора независимого возбуждения в режиме холостого хода при номинальном токе возбуждения.

3.4. Осуществить режим нагрузки генератора параллельного возбуждения при неизменном сопротивлении цепи обмотки возбуждения, определенном условиями п. 3.3 в. Установить диапазоны изменения тока возбуждения и напряжения генератора при росте тока якоря до номинального. Построить внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения.

3.5. Осуществить режим нагрузки генератора смешанного возбуждения при параметрах параллельной обмотки, определенных п. 3.4. Построить внешние характеристики генератора при согласном и встречном включениях последовательной и параллельной обмоток.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Руководствуясь принципиальной схемой рис. 15.1, составленной с учетом расположения приборов и аппаратов на стенде, нарисовать схему включения амперметров, вольтметра и реостатов в цепях

обмоток генератора независимого возбуждения. Около символов приборов проставить конечные значения шкал и знаки систем приборов.

4.2. Изобразить схему требуемого соединения выводов фаз обмотки приводного двигателя переменного тока с линейными проводами трехфазной сети.

4.3. Заготовить таблицу для записи показаний приборов в соответствии с п. 3.1 рабочего задания, а также миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями, снабженными масштабными делениями и числовыми отметками, необходимыми для построения характеристики холостого хода.

4.4. Изобразить примерный вид внешних характеристик генератора независимого возбуждения для токов возбуждения, составляющих 100, 75 и 50% от номинального. Отметить точку, соответствующую номинальному режиму. Составить перечень операций, необходимых для экспериментального определения номинального тока возбуждения, предусмотренного п. 3.2а рабочего задания.

4.5. Руководствуясь решением задачи 13.2 в [2], указать способ определения эквивалентного внутреннего сопротивления цепи обмотки якоря генератора независимого возбуждения по заданной внешней характеристике и записать соответствующую формулу.

4.6. В соответствии с п. 3.2б, в, г рабочего задания заготовить таблицу для записи показаний приборов, а также миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями, снабженными масштабными делениями и числовыми отметками, необходимыми для построения внешних и регулировочных характеристик.

4.7. Начертить схему соединения обмоток, реостатов и приборов, необходимых для проведения испытаний генератора согласно п. 3.3а, б, в, 3.4 и 3.5 рабочего задания. Около символов приборов проставить конечные значения шкал и знаки систем приборов.

4.8. Записать условия самовозбуждения генератора параллельного возбуждения при неизменных скорости и направлении вращения его якоря. Указать способ определения критического сопротивления обмотки возбуждения генератора по заданной характеристике холостого хода.

4.9. Составить перечень операций и таблицы для записи показаний приборов, предусмотренных п. 3.4 и 3.5 рабочего задания.

## **У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Обмотки машин следует соединять с измерительными приборами, пускорегулирующей и коммутирующей аппаратурой, руководствуясь предварительно составленными схемами.

5.2. При исследовании генератора независимого возбуждения реостат в цепи возбуждения необходимо включить по схеме потенциометра, а генераторы параллельного или смешанного возбуждения — последовательно с основной обмоткой возбуждения, причем так,

чтобы поворот ручки подвижного контакта вправо приводил к увеличению тока возбуждения.

5.3. Перед пуском приводного двигателя переменного тока необходимо по предварительно составленной схеме соединить короткими проводами со штырями гнезда выводов фаз обмотки ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ ) и трех линейных проводов сети ( $A, B, C$ ). Для пуска двигателя включить автомат сети АС-1 и нажать кнопку «Вп» («Вперед»). Для торможения двигателя нажать кнопку «Ст» («Стоп»).

5.4. При испытании генератора независимого возбуждения в режиме холостого хода следует измерить величину напряжения между его щетками сначала при отсутствии тока в обмотке возбуждения, а затем при монотонном увеличении этого тока до предельно возможной величины.

5.5. Внешние характеристики генератора при различных способах соединения его обмоток определять исходя из условия, что во всех случаях в режиме холостого хода между щетками генератора должны возникать напряжения одинаковой величины.

5.6. Внешние характеристики генератора независимого, параллельного и смешанного возбуждений построить на одном графике и определить для каждого из них процентное изменение напряжения при росте тока якоря до номинальной величины.

5.7. По характеристике холостого хода генератора независимого возбуждения определить величину критического сопротивления цепи возбуждения этого генератора при параллельном соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какой график называют характеристикой холостого хода генератора постоянного тока, а какие графики — его внешней и регулировочной характеристиками? При каких условиях их определяют?

6.2. Какой ток в обмотке возбуждения генератора независимого возбуждения следует считать номинальным? Как его определить в опыте нагрузки, руководствуясь известными паспортными данными генератора?

6.3. Начертите схемы соединения обмоток генератора параллельного и смешанного возбуждения.

6.4. Каковы условия самовозбуждения генератора параллельного возбуждения и как оно происходит?

6.5. Как определить величину критического сопротивления цепи возбуждения генератора параллельного возбуждения по известной характеристике холостого хода этого генератора при независимом возбуждении?

6.6. Почему самовозбуждение шунтового генератора при неизменном направлении вращения его якоря возможно при одном присоединении концов обмотки возбуждения к щеткам машины и невозможно при другом?

6.7. Почему при одном и том же токе якоря напряжение между

щетками генератора с параллельным возбуждением будет ниже, чем при независимом возбуждении того же генератора?

6.8. Как определить эквивалентное сопротивление цепи якоря генератора независимого возбуждения по его известной внешней характеристике?

6.9 Чем отличается вид внешних характеристик генератора смешанного возбуждения с согласным и встречным включениями параллельной и последовательной обмоток?

6.10. Чем отличаются регулировочные характеристики генератора при независимом и параллельном возбуждении?

## **Работа № 16**

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить влияние момента сопротивления на угловую скорость вращения якоря, ток в его обмотке и к.п. д. двигателя при параллельном и смешанном возбуждении. Ознакомиться с автоматической системой пуска и защиты двигателя постоянного тока.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Приборная панель стенда с мнемонической схемой машин и пуско-регулирующих аппаратов показана на рис. 16.1.

В качестве двигателя используется машина постоянного тока смешанного возбуждения типа П-32 со следующими номинальными данными: напряжение 220 В, механическая мощность 2,2 кВт, частота вращения вала 1500 об/мин, ток в линейных проводах 10 А, ток возбуждения 0,7 А, к. п. д. 80%.

Нагрузкой двигателя служит электромагнитный тормоз ЭМТ системы МЭИ, допускающий плавное регулирование создаваемого им момента сопротивления за счет изменения величины постоянного тока в обмотке возбуждения тормоза (см. приложение П 16.1).

Момент сопротивления измеряют с помощью электротензометрического мостового преобразователя и микроамперметра со шкалой, имеющей числовые отметки, соответствующие моменту  $M$  на валу двигателя.



Частоту вращения вала двигателя измеряют магнитоэлектрическим тахогенератором *ТГ* и вольтметром со шкалой, имеющей числовые отметки, соответствующие числу *n* оборотов вала двигателя в минуту.

Цепь якоря двигателя включают в сеть и отключают от сети постоянного напряжения 220 В посредством двухполюсного автоматического выключателя АС-2 и линейного контактора *К*, управляемого (см. приложение П 16.2) кнопками «Вкл.» («Включено») и «Откл.» («Отключено»).

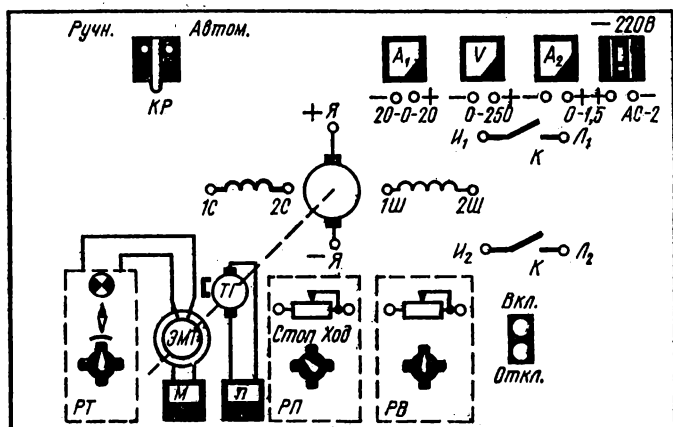


Рис. 16.1

На стенде установлен пусковой реостат *РП*, состоящий из секций, отключаемых (выводимых) либо вручную, при повороте подвижного контакта, либо автоматически, при нажатии кнопки «Вкл.» (см. приложение П 16.3). Для осуществления желаемого пуска служит вспомогательный ключ *КР*, который устанавливают в соответствующую позицию «Ручн.» («Ручной пуск») или «Автом.» («Автоматический пуск»).

На стенде имеются вольтметр на 250 В, амперметр на 1,5 А и амперметр с двусторонней шкалой на 20 А.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Произвести ручной пуск двигателя при параллельном соединении обмоток возбуждения и якоря без механической нагрузки (при выключенном тормозе) и оценить среднюю величину пускового тока.

3.2. Произвести автоматический пуск двигателя параллельного возбуждения без механической нагрузки (при выключенном тормозе) и оценить величины скоростей вращения вала двигателя, а также тока в линейных проводах в моменты автоматического отключения секций пускового реостата.

3.3. Осуществить режим нагрузки двигателя параллельного возбуждения и, регулируя величину момента сопротивления на валу тормоза, определить зависимость скорости вращения якоря, тока в обмот-

ке якоря и к. п. д. от механической мощности двигателя. Построить рабочий участок механической естественной характеристики и рабочие характеристики двигателя.

3.4. Осуществить режим нагрузки двигателя с согласным и встречным включениями параллельной и последовательной обмоток возбуждения. По данным опытов построить механические естественные и рабочие характеристики. Установить, при каком включении обмоток двигатель работает в режиме, определенном величинами, указанными в паспортной табличке. Сравнить к. п. д., рассчитанный по опытным данным для номинального момента, с к. п. д., указанным в паспортной табличке.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. По заданной схеме включения релейно-контакторной аппаратуры системы автоматического управления пуском двигателя параллельного возбуждения (см. приложение П16.3) установить очередность срабатывания всех ее элементов после нажатия кнопки «Вкл.».

Ознакомиться с главой «Машины постоянного тока» в [1] и нарисовать примерный вид кривых изменения во времени скорости вращения якоря и тока в его обмотке при двухступенчатом реостатном пуске двигателя без нагрузки. Изобразить пунктирными линиями вид этих кривых при пуске двигателя с постоянным моментом сопротивления.

4.2. Составить схему соединения обмоток двигателя параллельного возбуждения, а также реостатов, амперметра и вольтметра, необходимых для выполнения п. 3.3 рабочего задания. Около символов приборов проставить конечные значения шкал и знаки систем приборов.

4.3. Изобразить ожидаемый вид кривых зависимости угловой скорости вращения якоря и тока в его обмотке от момента сопротивления.

4.4. Записать формулу для вычисления номинального момента двигателя по паспортным данным, а также формулы для расчета механической мощности, угловой скорости вращения якоря и к. п. д. двигателя по показаниям измерительных приборов, используемых при испытании двигателя в режиме нагрузки.

4.5. В соответствии с п. 3.3 рабочего задания заготовить таблицы для записи показаний приборов, а также миллиметровую бумагу размером 100 × 100 мм с координатными осями, снабженными масштабными делениями и числовыми отметками откладываемых величин.

4.6. Начертить схему соединения обмоток двигателя смешанного возбуждения с реостатами и измерительными приборами, необходимыми для выполнения п. 3.4 рабочего задания.

4.7. Изобразить примерный вид механических естественных характеристик двигателя смешанного возбуждения при согласном и встречном включениях последовательной и параллельной обмоток возбуждения.

4.8. Составить перечень операций и указать требуемую последовательность их при выполнении п. 3.3 и 3.4 рабочего задания.

4.9. Ознакомиться со схемой защиты двигателя [см. приложение П 16.2] и указать ее действие при длительных перегрузках двигателя, а также при снижении или при исчезновении напряжения на обмотке возбуждения.

#### **У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Сборку схемы двигателя целесообразно начать с ветви параллельной обмотки возбуждения, включив в нее амперметр и реостат *РВ*. Эту ветвь следует соединить с гнездами  $L_1$  и  $L_2$  выводов сети 220 В (см. приложение П 16.2, рис. 16.3).

Ветвь цепи обмотки якоря с пусковым реостатом и амперметром (см. приложение П 16.3, рис. 16.4) необходимо присоединить к выводам  $I_1$  и  $I_2$  контактов линейного контактора *К*.

5.2. Для ручного пуска двигателя прежде всего необходимо поставить ключ *КР* в положение «Ручн.», а тормоз отключить. Затем включить автомат сети АС-2 и с помощью реостата возбуждения *РВ* установить в цепи шунтовой обмотки номинальный ток. Наконец, нажать кнопку «Вкл.» контактора *К* и постепенно (за  $3 \div 4$  с) повернуть ручку реостата *РП* из положения «Стоп» в положение «Ход» (до упора), контролируя по амперметру величину пускового тока, которая не должна превышать номинальную более чем в  $1,5 \div 2$  раза. Особое внимание следует обратить на конечное положение ручки пускового реостата: оставлять ее в промежуточном положении между позициями «Стоп» и «Ход» недопустимо, так как это приведет к перегреву элементов реостата, рассчитанных только на кратковременное включение.

5.3. Операции по торможению двигателя производят в обратной последовательности: ручку пускового реостата поворачивают в позицию «Стоп», нажимают кнопку «Откл.» линейного контактора и отключают автомат сети АС-2.

5.4. Для автоматического пуска двигателя сначала необходимо поставить ключ *КР* в положение «Автом.» и отключить тормоз. Затем включить автомат сети АС-2 и возбудить двигатель. После этого нажать кнопку «Вкл.» в цепи линейного контактора. Для торможения двигателя достаточно нажать кнопку «Откл.»

5.5. При определении рабочего участка механической естественной характеристики двигателя следует сначала добиться создания на валу тормоза номинального момента при номинальной скорости (регулируя ток возбуждения двигателя и тормоза), а затем постепенно снижать момент.

5.6. Механические естественные характеристики и зависимость тока якоря от электромагнитного момента двигателя с параллельным и смешанным возбуждением построить на одном графике.

5.7. Рабочие характеристики двигателя с параллельным и смешанным возбуждением построить на одном графике.

5.8. Определить процентное изменение скорости вращения якоря

двигателя с параллельным и смешанным возбуждением при росте нагрузки до номинальной.

5.9. Рассчитать, какой была бы величина тока в обмотке неподвижного якоря, если бы пуск двигателя произошел без пускового реостата.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какой график называют механической естественной характеристикой двигателя постоянного тока, а какие графики — его рабочими характеристиками? При каких условиях их определяют?

6.2. Каково назначение пускового реостата двигателя постоянного тока? Нарисуйте схему его включения.

6.3. В какой последовательности срабатывают реле времени и контакторы ускорения в системе автоматического пуска двигателя?

6.4. Как обеспечивается защита двигателя от длительных перегрузок и ослабления основного потока?

6.5. От чего зависит угловая скорость вращения якоря двигателя параллельного возбуждения в режиме холостого хода?

6.6. Изобразите механические естественные характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласном и встречном включениях шунтовой и серийной обмоток.

6.7. Какими величинами определяется установившийся ток в обмотке якоря, вращающегося с постоянной скоростью?

6.8. Как изменится установившийся ток в обмотке якоря двигателя параллельного возбуждения, работающего при неизменном моменте сопротивления, если напряжение между щетками уменьшится?

6.9. Как по заданной механической естественной характеристике двигателя параллельного возбуждения определить величину эквивалентного сопротивления цепи якоря?

6.10. Как при заданном пусковом моменте и номинальных данных двигателя определить величину сопротивления пускового реостата?

6.11. Как происходит процесс саморегулирования электродвигателя при изменении момента сопротивления на его валу?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 16.1. Электромагнитный тормоз системы МЭИ

Для создания регулируемого по величине момента сил, противодействующих вращению якоря исследуемого электродвигателя, на лабораторном стенде установлен электромагнитный тормоз системы МЭИ. Схема его устройства показана на рис. 16.2.

Основными частями тормоза являются поворотный статор и ротор.

Статор тормоза расположен внутри ротора и выполнен в форме стальной крестовины 1 с четырьмя катушками 2, образующими обмотку возбуждения. Крестовина имеет центральное отверстие для подшипника, насаженного на неподвижный цилиндрический выступ 3, охватывающий вал 4. Поэтому она может быть повернута вокруг оси вращения вала, однако только на малый угол, так как ее повороту препятствует упругая стальная спица 5, один конец которой прочно укреплен в крестовине, а другой — свободный — упирается в ограничитель 7 на фундаменте.

Ротор тормоза изготовлен в форме стального цилиндра, насаженного на вал. При разомкнутой обмотке возбуждения тормоза вращающийся якорь двигателя не будет испытывать какого-либо механического противодействия со стороны ротора тормоза.

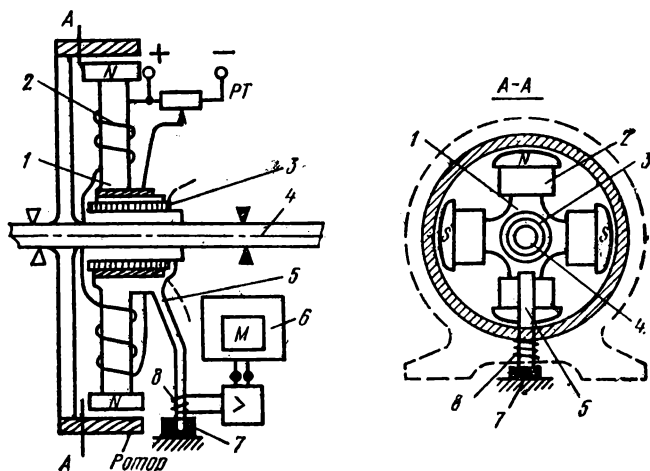


Рис. 16.2

При включении обмотки возбуждения тормоза в сеть постоянного напряжения в стальной крестовине поворотного статора и в стальном цилиндре ротора возникнет постоянное магнитное поле, интенсивность которого будет зависеть от величины постоянного тока в обмотке возбуждения тормоза. Если при этом привести якорь двигателя во вращение, то в стальном цилиндре ротора тормоза наведутся вихревые токи, взаимодействующие с основным магнитным полем, возбужденным постоянным током в катушках полюсной системы тормоза. На валу двигателя будет создан тормозной момент, под действием которого стальная спица начнет изгибаться, а крестовина — поворачиваться. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока момент сил упругой деформации спицы не уравновесит момент, создаваемый тормозом. Крестовина с электромагнитами постоянного тока придет в неподвижное состояние, а кинетическая энергия вращающегося якоря двигателя будет полностью преобразована в тепло, вызывая нагрев стального цилиндра ротора тормоза.

Величину постоянного тока в обмотке возбуждения тормоза регулируют реостатом *PT*. На любое изменение положения подвижного контакта реостата *PT* тормозное устройство ответит соответствующей деформацией спицы и новым поворотом крестовины. При полной нагрузке двигателя температура нагрева ротора тормоза достигает  $300 \pm 350^\circ\text{C}$ .

Для измерения величины создаваемого момента на стальную спицу тормоза прикрепляют тензорезисторы 8. Как известно, их сопротивление изменяется при растяжении или сжатии. Тензорезисторы соединяют с линейными резисторами по схеме четырехплечного моста, который балансируют при холостом ходе двигателя. В измерительную диагональ моста включают микроамперметр 6, по показаниям которого и судят о величине момента, действующего на валу двигателя в режиме нагрузки.

## П 16.2. Система автоматической защиты двигателя

Цепь якоря двигателя постоянного тока, как указывалось, включают в сеть и отключают от сети линейным контактором *K*, управляемым кнопками «Вкл.» и «Откл.». Этот контактор является исполнительным элементом системы автома-

тической защиты двигателя, схематично изображенной на рис. 16.3. Другими ее элементами являются реле максимального тока *МТ* и реле минимального напряжения *Н*.

Реле максимального тока *МТ* предназначено для защиты обмотки якоря от перегрева и щеточного-коллекторного узла от недопустимого искрения при длительных перегрузках двигателя. Обмотку реле максимального тока включают последовательно с обмоткой якоря.

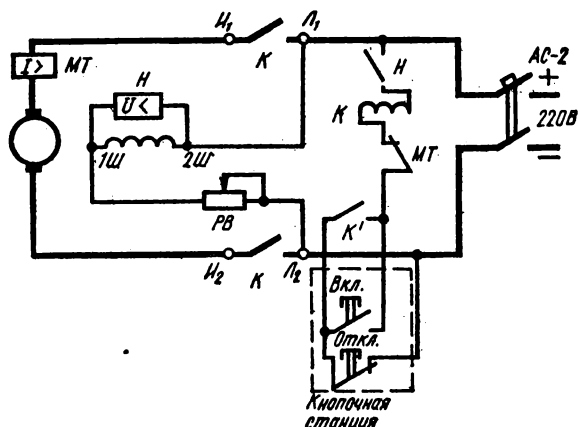


Рис. 16.3

Реле минимального напряжения *Н* служит для предотвращения работы двигателя с ослабленным основным магнитным полем, а также для исключения самозапуска двигателя при выведенном реостате в цепи якоря, возможного вследствие временного исчезновения и последующего восстановления напряжения сети. Обмотку реле минимального напряжения включают параллельно шунтовой обмотке двигателя.

Реле максимального тока имеет нормально-замкнутую, а реле напряжения — нормально-разомкнутую контактные пары, которые включены в цепь обмотки *К* линейного контактора последовательно с нормально-разомкнутой кнопкой «Вкл.» и нормально-замкнутой кнопкой «Откл.». Кнопку «Вкл.» шунтирует нормально-разомкнутый блок-контакт *К'* линейного контактора. Два неподвижных контакта главных контактных пар *К* линейного контактора присоединены к выводам  $L_1$  и  $L_2$  сети постоянного напряжения, а к двум выводам  $H_1$  и  $H_2$  их подвижных контактов присоединена цепь якоря с пусковым реостатом и амперметром.

Для включения цепи якоря в сеть достаточно нажать кнопку «Вкл.». Если к этому моменту на шунтовую обмотку возбуждения двигателя (а следовательно, и на обмотку *Н* реле напряжения) будет подано напряжение, то нормально-разомкнутая контактная пара *Н* реле напряжения замкнет свои контакты и в обмотке *К* линейного контактора возникнет ток. Главные контакты *К* линейного контактора замкнутся и выводы цепи якоря будут присоединены к выводам сети. Одновременно замкнется блок-контакт *К'* линейного контактора, шунтирующий кнопку «Вкл.», которую после этого можно отпустить. Для отключения цепи якоря от сети достаточно нажать кнопку «Откл.».

При чрезмерно большом токе в обмотке якоря сработает реле максимального тока и его нормально-замкнутые контакты *МТ* разомкнутся, что приведет к автоматическому отключению обмотки *К* линейного контактора от сети, а следовательно, и к отключению цепи якоря. К тому же эффекту приведет недопустимое снижение напряжения на шунтовой обмотке и на обмотке *Н* реле напряжения, которое разомкнет свои контакты *Н*.

## П 16.3. Пускорегулирующая аппаратура

Для включения в сеть двигателей параллельного и смешанного возбуждения на каждом стенде установлены два отдельных реостата стандартных конструкций, один из которых предназначен для регулирования тока в шунтовой обмотке, а другой — для включения в цепь якоря на время пуска двигателя.

Пусковой реостат состоит из нескольких резисторов, выключаемых вручную или автоматически.

### Неавтоматизированный реостатный пуск двигателя

Реостатный пуск двигателя с ручным регулированием представляет собой процесс введения в цепь якоря группы резисторов и последующего поочередного их отключения, осуществляемый поворотом рычага.

Отличительная особенность пускового реостата с ручным регулированием состоит в том, что в нем применены специальные контактные секторы, имеющие разъемное соединение с проводами цепи якоря. Кроме того, в нем установлены реле максимального тока и минимального напряжения, являющиеся элементами автоматической защиты двигателя.

В связи с использованием этих реле в системе автоматической защиты машин, устанавливаемых на стенде (см. приложение П 16.2), схема включения пускового реостата в цепь якоря двигателя была упрощена (рис. 16.4).

Действие пускового реостата совершается в такой последовательности. Сначала включают автоматический двухполюсный выключатель АС-2 и устанавливают номинальный ток возбуждения. Рычаг пускового реостата ставят в позицию «Стоп», что приводит к короткому замыканию обмотки РН реле напряжения. Затем нажимают кнопку «Вкл.» в цепи линейного контактора К и поворачивают рычаг пускового реостата в положение I. При этом на обмотку РН реле напряжения будет подано напряжение сети, а его контакты замкнутся и соединят контактный сектор с выводом  $I_2$  в цепи якоря.

Далее поворачивают рычаг пускового

реостата в положение II. В цепь обмотки РН реле напряжения окажется введенным ограничивающий резистор с сопротивлением  $r_0$ , а в цепь обмотки якоря — вся группа пусковых резисторов. При поочередном контакте поворотного рычага с выводами III, IV, V и «Ход» произойдет практически плавное нарастание скорости вращения якоря и наступит установившийся режим работы двигателя.

Для торможения двигателя достаточно рычаг пускового реостата вновь перевести в положение «Стоп», вызывающее размыкание контактов РН реле напряжения, а следовательно, и размыкание цепи якоря. Пусковой реостат тем самым будет подготовлен к повторному включению двигателя.

### Автоматизированный реостатный пуск двигателя в функции времени

Для ознакомления с системой устройств, автоматизирующих процесс отключения резисторных элементов пускового реостата в функции времени, на стенде собран комплект релейно-контакторной аппаратуры и установлен вспомогательный переключатель, схема соединения которых представлена на рис. 16.5.

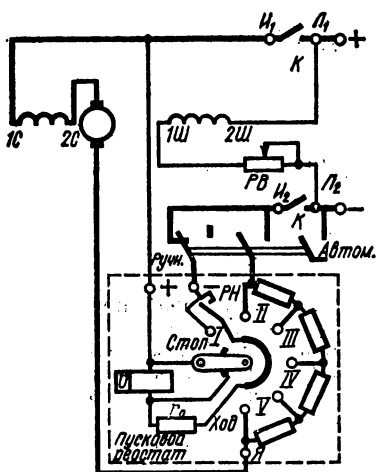


Рис. 16.4

Комплект состоит из двух контакторов  $1У$  и  $2У$ , называемых контакторами ускорения, и двух электромагнитных реле времени  $1В$  и  $2В$ . Контакты этих аппаратов изображены на схеме рис. 16.5 в положениях, соответствующих отсутствию токов в обмотках.

Контакторы  $1У$  и  $2У$  имеют замыкающие контакты, используемые для отключения двух групп резисторных элементов пускового реостата, заключенных между выводами  $II-IV$  и  $IV$  — «Ход».

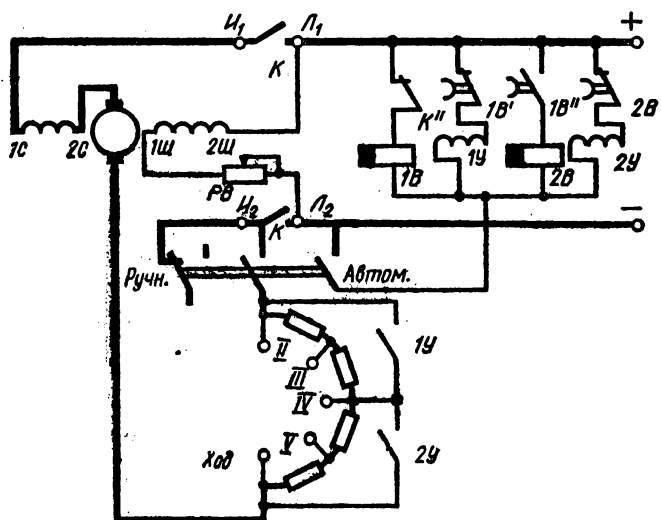


Рис. 16.5

Электромагнитное реле времени  $1В$  снабжено двумя контактами, один из которых ( $1В'$ ) размыкающий, с выдержкой времени при замыкании, а другой ( $1В''$ ) — замыкающий, с выдержкой времени при размыкании. Замыкание контакта  $1В'$  и размыкание контакта  $1В''$  происходят с замедлением при отпуске реле, т. е. после отключения его обмотки от сети постоянного напряжения. Условные графические обозначения этих контактов на схеме свидетельствуют о том, что размыкание контакта  $1В'$  и замыкание контакта  $1В''$  совершаются почти мгновенно после срабатывания реле, т. е. после подачи постоянного напряжения на обмотку реле.

Электромагнитное реле времени  $2В$  ничем не отличается от реле  $1В$ . Однако в рассматриваемой системе используется лишь один его контакт  $2В$ , который, так же как и контакт  $1В'$ , является размыкающим при срабатывании и замыкающим с выдержкой времени при отпуске реле.

Вспомогательный переключатель изображен на рис. 16.5 как трехполюсный двухпозиционный (ручной или автоматизированный пуск); на mnemonicической схеме стенда (см. рис. 16.1) он обозначен буквами  $КР$  (ключ режима). Его назначение — обеспечить возможность использования пускового реостата с ручным управлением в системе автоматизированного реостатного пуска электродвигателя постоянного тока. Одновременно этот переключатель является устройством блокировки: при ручном пуске он исключает автоматизированный и наоборот.

В позиции «Ручн.» (Ручной пуск) вывод  $И_2$  от главного контакта линейного контактора  $К$  окажется соединенным с пусковым реостатом по схеме рис. 16.4, а цепи всех обмоток реле времени и контакторов ускорения — отключенными от линейного провода  $Л_2$ .

В позиции «Автом.» («Автоматический пуск») вывод  $И_2$  от главного контакта линейного контактора  $К$  будет соединен с контактными выводами  $II$  первого ре-



зисторного элемента пускового реостата, а все обмотки реле времени и контакторов ускорения — присоединенными к линейному проводу  $L_2$ .

Автоматизированный реостатный пуск начинается с включения автомата сети АС-2 и последующего регулирования тока в параллельной обмотке возбуждения. При замкнутом блок-контакте  $K''$  (линейного контактора  $K$ ) реле времени  $1B$  сработает и быстро разомкнет контакт  $1B'$  и замкнет контакт  $1B''$ . Вслед за этим сработает реле времени  $2B$ , что приведет к быстрому размыканию контакта  $2B$ . В результате отмеченных изменений в состояниях контактов реле времени цепи обмоток контакторов ускорения  $1У$  и  $2У$  окажутся разомкнутыми, а в обмотках реле времени  $1B$  и  $2B$  установятся постоянные токи.

Завершающим сигналом к началу автоматизированного пуска двигателя служит нажатие кнопки «Вкл.» в цепи обмотки линейного контактора  $K$  (см. схему рис. 16.3), что приведет к замыканию его двух главных контактов  $K$ , а также одного блок-контакта  $K'$ , шунтирующего кнопку «Вкл.». Пусковой реостат полностью будет введен в цепь якоря. Одновременно с этим разомкнется второй блок-контакт  $K''$  линейного контактора, что вызовет отпускание реле времени  $1B$ . Его контакт  $1B'$  с определенной выдержкой времени замкнется, а контакт  $1B''$  с той же выдержкой времени разомкнется. За это время якорь двигателя придет во вращение с соответствующим ускорением. В момент замыкания контакта  $1B'$  сработает первый контактор ускорения  $1У$  и первая группа резисторных элементов реостата будет отключена. Ток в якоре и вращающий момент двигателя резко возрастут, а якорь получит новое ускорение.

В тот же момент времени отпустит второе реле времени, а его контакт  $2B$  с известной выдержкой времени замкнется и вызовет срабатывание второго контактора ускорения. Контактная пара  $2У$  этого контактора замкнется и полностью отключит пусковой реостат из цепи якоря. За этим последует новое ускорение и скорость вращения якоря будет нарастать до тех пор, пока вращающий момент двигателя не уравновесит противодействующий момент, создаваемый при лабораторном исследовании электромагнитным тормозом. На этом процесс пуска завершится и якорь двигателя начнет вращаться с постоянной скоростью.

## **Работа № 17**

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСКУССТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Исследовать влияние сопротивления реостата в цепи якоря, тока в обмотке возбуждения и напряжения между щетками на скорость вращения и ток в обмотке якоря двигателя, работающего с заданными моментами. Получить навыки регулирования скорости вращения якоря двигателя постоянного тока.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве двигателя используется машина постоянного тока смешанного возбуждения типа П-32 со следующими номинальными данными: напряжение 220 В, ток обмотки якоря 9,3 А, механическая мощ-



Обмотку возбуждения и обмотку якоря двигателя включают в двухпроводную сеть постоянного напряжения двухполюсным автоматом АС-2.

Для якорного регулирования двигателя служит машина постоянного тока соседнего стенда, которую применяют в качестве генератора независимого возбуждения. Эту часть лабораторного задания выполняют одновременно две бригады. Приборные панели двух соседних стендов с мнемоническими схемами машин, образующих электропривод системы Г—Д (электропривод постоянного тока системы генератор — двигатель), приведены на рис. 17.2.

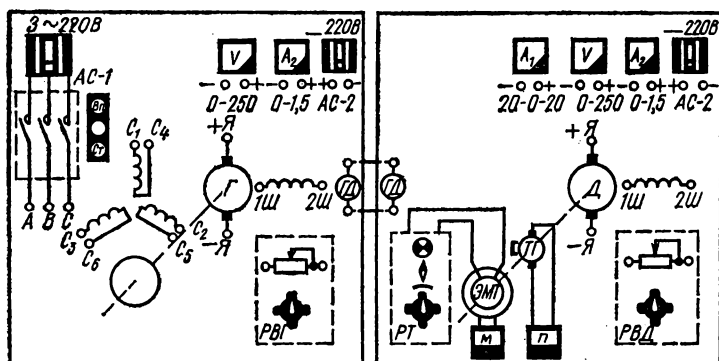


Рис. 17.2

Информация об использовании машины типа П-32 в качестве генератора независимого возбуждения и необходимых соединениях в цепях вращающего его якорь двигателя переменного тока приведена в руководстве к лабораторной работе № 15 (см. разд. II и V).

Для удобства сборки цепи обмоток якорей генератора и двигателя на каждом соседнем стенде установлены гнезда, обозначенные буквами Г—Д, соединенные друг с другом на тыльной стороне обоих стендов двухжильным кабелем.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить полюсное регулирование скорости вращения якоря ненагруженного двигателя независимого возбуждения. Определить зависимость скорости вращения якоря в режиме холостого хода двигателя от тока возбуждения при номинальном напряжении между щетками и построить соответствующую регулировочную характеристику холостого хода двигателя.

3.2. Осуществить режим нагрузки двигателя независимого возбуждения при введенных в цепь якоря одной и двух секциях регулировочного реостата. Определить в обоих случаях зависимость скорости вращения якоря и тока в его обмотке от момента сил сопротивления,

построить соответствующие механические искусственные характеристики двигателя.

3.3. Осуществить режим нагрузки двигателя независимого возбуждения при токе возбуждения, равном 0,8 и 0,7 от номинального. Определить в обоих случаях зависимость скорости вращения якоря и тока в его обмотке от момента сил сопротивления, построить соответствующие механические искусственные характеристики двигателя.

3.4. Осуществить режим нагрузки двигателя независимого возбуждения при напряжении на обмотке якоря, составляющем 0,75 и 0,4 от номинального. Определить в обоих случаях зависимость скорости вращения якоря и тока в его обмотке от момента сил сопротивления, построить соответствующие механические искусственные характеристики двигателя.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Составить перечень операций по осуществлению ручного реостатного пуска двигателя независимого возбуждения и указать требуемую последовательность их выполнения.

4.2. Изобразить вид кривой зависимости угловой скорости вращения якоря ненагруженного двигателя независимого возбуждения от величины его основного магнитного потока.

4.3. Начертить схему соединения обмоток двигателя независимого возбуждения с регулировочными реостатами и измерительными приборами, необходимыми для выполнения п. 3.2 и 3.3 рабочего задания. Около символов приборов проставить конечные значения шкал и знаки систем приборов.

4.4. Составить перечень операций по осуществлению реостатного и полюсного регулирования скорости вращения якоря двигателя, указать требуемую последовательность и способы контроля правильности их выполнения.

4.5. Записать формулу для вычисления номинального момента двигателя по паспортным данным.

4.6. Изобразить на одном графике примерный вид механических естественной и искусственных характеристик двигателя независимого возбуждения, соответствующих реостатному, полюсному и якорному регулированию.

4.7. Начертить схему соединения обмоток машин в системе Г—Д с источником питания, регулировочными реостатами и измерительными приборами, необходимыми для выполнения п. 3.4 рабочего задания.

4.8. Заготовить таблицы для записи результатов испытания двигателя по каждому этапу рабочего задания, а также миллиметровую бумагу размером 100 × 100 мм с координатными осями, снабженными масштабными делениями и числовыми отметками откладываемых величин, необходимыми для построения соответствующих характеристик.

## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Для ручного пуска двигателя при номинальном напряжении на обмотке якоря можно использовать регулируемый секционный реостат *РН* с пакетным переключателем.

5.2. Полюсное регулирование ненагруженного двигателя следует начинать при номинальном токе в обмотке возбуждения, который затем можно постепенно уменьшать до тех пор, пока скорость вращения якоря не достигнет 1,7 от номинальной.

5.3. При сборке системы Г—Д из машин на общем фундаменте двух соседних стендов зажимы обмотки якоря каждой машины типа П-32 следует соединить с гнездами Г—Д, имеющимися на каждом стенде. Реостат возбуждения *РВ* машины, используемой в качестве генератора, надо включить по схеме потенциометра. Перед включением необходимо выполнить соединения в цепи рабочей обмотки трехфазного электродвигателя в соответствии с разд. II и V руководства к лабораторной работе № 15.

5.4. Пуск системы Г—Д начать с включения обмотки возбуждения двигателя в двухпроводную сеть 220 В при выведенном реостате *РВД* в его цепи.

Подвижный контакт потенциометра *РВГ* в цепи обмотки возбуждения генератора поставить в положение, соответствующее отсутствию тока возбуждения. Затем включить в трехфазную сеть приводной двигатель генератора и, контролируя величину тока в цепях якорей генератора и двигателя, постепенно повысить напряжение между щетками двигателя до требуемой величины.

5.5. Для торможения системы Г—Д снять нагрузку с двигателя (отключив обмотку возбуждения тормоза), а затем снизить напряжение между щетками генератора. Наконец, остановить трехфазный приводной двигатель и отключить обмотку возбуждения испытуемого двигателя постоянного тока.

5.6. По результатам опытов построить на одном графике механические искусственные характеристики двигателя. Там же показать пунктирной линией механическую естественную характеристику двигателя.

5.7. По механическим характеристикам и паспортным данным оценить величины сопротивлений секций реостата, введенных в цепь якоря при реостатном регулировании скорости вращения вала двигателя, а также к. п. д. двигателя в этих условиях для момента нагрузки, равного номинальному.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Какие механические характеристики двигателей постоянного тока называют искусственными?

6.2. Как осуществляется реостатное, полюсное и якорное регулирование скорости вращения вала двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

6.3. Каков примерный вид механических искусственных характеристик при реостатном, полюсном и якорном регулировании скорости вращения вала двигателя независимого возбуждения?

6.4. Почему скорость вращения вала двигателя параллельного возбуждения не регулируют за счет снижения напряжения на его обмотке якоря?

6.5. Как рассчитать величину сопротивления регулировочного реостата в цепи якоря по известной механической искусственной характеристике и паспортным данным?

6.6. Как происходит изменение скорости вращения вала двигателя и тока в обмотке якоря после увеличения сопротивления цепи якоря при неизменном моменте сопротивления нагрузки?

6.7. Как происходит изменение скорости вращения вала двигателя и тока в цепи якоря после уменьшения потока возбуждения, если момент сопротивления нагрузки сохранить неизменным?

6.8. Почему в цепь якоря двигателя в системе Г—Д не включают пусковой реостат?

6.9. Как изменить направление вращения якоря двигателя в системе Г—Д?

## **Работа № 18**

### **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИН ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ОБМОТКИ СТАТОРА НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Исследовать возможность повышения коэффициента мощности и к. п. д. недогруженного асинхронного двигателя за счет снижения напряжений на фазах обмотки статора. Ознакомиться с аппаратурой управления и защиты, а также с однофазным режимом работы двигателя, вызванным обрывом линейного провода.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Приборная панель стенда с мнемонической схемой машин и пуско-регулирующих аппаратов изображена на рис. 18.1.

Исследуется трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа АО-42-4. Номинальные данные: 2,8 кВт; 1420 об/мин; 220/380 В; 10,5/6,1 А; 50 Гц;  $\eta = 83,5\%$ ;  $\cos\varphi = 0,84$ ;  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 1,9$ ;  $M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}} = 2$ ;  $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 5,5$ .

Фазы обмотки статора двигателя могут быть соединены либо треугольником, либо звездой и включены в трехфазную сеть 220 В с помощью трехполюсного автомата АС-1 и реверсивного магнитного пускателя, снабженного кнопками управления «Вп» («Вперед»), «Нз» («Назад»), «Ст» («Стоп») (см. приложение П 18.1).

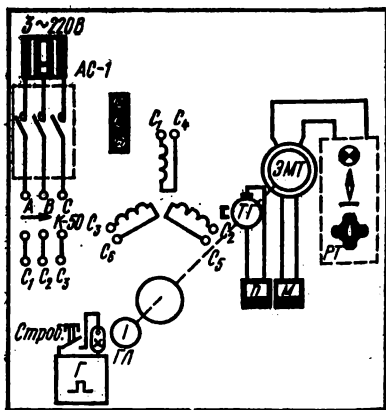


Рис. 18.1

Для нагрузки двигателя применен электромагнитный тормоз ЭМТ системы МЭИ (см. приложение П 16.1). Величина момента сопротивления, создаваемого тормозом, зависит от тока в обмотке электромагнита, который регулируют реостатом РТ.

Для измерения момента сопротивления, создаваемого электромагнитным тормозом на валу двигателя, служит электротензометрический мостовой преобразователь, к выходным зажимам которого присоединен электроизмерительный прибор со шкалой, имеющей

числовые отметки, соответствующие величине момента  $M$ .

Частота вращения вала двигателя может быть измерена магнито-электрическим тахогенератором ТГ и вольтметром со шкалой, имеющей числовые отметки, соответствующие числу  $n$  оборотов вала двигателя в минуту. Частоту вращения вала двигателя можно определить также с помощью стробоскопического устройства и секундомера (см. приложение П 18.2).

Для измерения фазных напряжений, токов и активной мощности служит комплект приборов К-50, снабженный многопредельным трансформатором тока (см. приложение П 18.3).

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода двигателя при номинальном напряжении на фазах обмотки статора. Измерить ток холостого хода и скорость вращения вала, а также определить коэффициент мощности двигателя в условиях свободного вращения его ротора без нагрузки.

3.2. Осуществить режим нагрузки двигателя при номинальном напряжении на фазах обмотки статора. Измерить ток в фазе обмотки статора, определить коэффициент мощности, к. п. д. и скорость вращения вала двигателя при номинальном моменте, кратковременной перегрузке и частичных нагрузках. Построить рабочий участок механической естественной характеристики и рабочие характеристики. Сравнить величины к. п. д. и коэффициента мощности при номинальном моменте с паспортными данными. Определить, какую долю от величины номинального тока составляет ток холостого хода.

3.3. Осуществить режим холостого хода двигателя при пониженных в  $\sqrt{3}$  раз напряжениях на фазах обмотки статора. Измерить ток холостого хода и определить коэффициент мощности.

3.4. Осуществить режим нагрузки двигателя при пониженных в  $\sqrt{3}$  раз напряжениях на фазах обмотки статора. Измерить ток в фазе обмотки статора, определить коэффициент мощности, к. п. д. и скорость вращения вала двигателя при моментах сопротивления, меньших 0,4 от номинального момента. Построить рабочий участок механической искусственной характеристики. Построить графики зависимости к. п. д. и коэффициента мощности от механической полезной мощности двигателя, работающего при пониженных в  $\sqrt{3}$  раз фазных напряжениях.

3.5. (Факультативно). При пониженных в  $\sqrt{3}$  раз напряжениях на фазах обмотки статора и при отсутствии нагрузки на валу двигателя с вращающимся ротором отсоединить один из линейных проводов. Отметить, продолжает ли ротор вращаться. Плавно увеличивать момент сопротивления тормоза и оценить величину максимального момента, создаваемого двигателем в однофазном режиме, а также критическую скорость вращения его ротора.

У к а з а н и е: при резком снижении скорости вращения вала немедленно нажать кнопку «Ст» («Стоп».)

Построить механическую характеристику двигателя в однофазном режиме.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. По [1] и приложению П18.1 изучить работу магнитного пускателя при пуске, реверсировании и торможении двигателя, а также при его перегрузке и аварийных состояниях.

4.2. Начертить схему соединения выводов статорной обмотки, при которой на ее фазах (после включения в сеть) будут действовать напряжения, равные номинальным. По данным каталога вычислить величину пускового тока в фазе обмотки статора.

4.3. Начертить схему соединения выводов статорной обмотки, при которой на ее фазах (после включения в сеть) будут действовать напряжения, меньше номинальных в  $\sqrt{3}$  раз.

4.4. Руководствуясь приложением П 18.3, начертить схему соединения выводов измерительного комплекта К-50 с выводами статорной обмотки двигателя и тремя линейными проводами трехфазной сети.

4.5. Руководствуясь [1, 2] и приложениями П 18.2 и П 18.3, записать формулы для расчета по показаниям измерительных приборов и устройств следующих величин: а) коэффициента мощности; б) механической полезной мощности двигателя; в) скольжения и частоты вращения вала; г) коэффициента полезного действия.

4.6. Руководствуясь решением задачи 11.3 в [2], рассчитать по паспортным данным исследуемого двигателя его номинальный момент.



4. 7. По данным каталога начертить примерный вид механической естественной характеристики испытуемого двигателя, указав на ней точки, соответствующие режимам холостого хода, номинальной нагрузки, максимального вращающего момента и пуска. Критическое скольжение вычислить по формуле

$$s_{кр} = s_n \left[ \frac{M_{max}}{M_{ном}} + \sqrt{\left( \frac{M_{max}}{M_{ном}} \right)^2 - 1} \right].$$

На том же графике изобразить механическую искусственную характеристику, соответствующую работе двигателя при пониженных в  $\sqrt{3}$  раз напряжениях на фазах обмотки статора.

4.8. Составить перечни операций, необходимых для осуществления каждого этапа рабочего задания.

4.9. Заготовить таблицы для записи показаний измерительных приборов и результатов расчета всех величин, предусмотренных каждым этапом рабочего задания.

4.10. Заготовить миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм для построения характеристик, предусмотренных п. 3.2 и 3.4 рабочего задания. Нанести координатные оси со шкалами соответствующих величин.

#### **У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Пуск двигателя при номинальных и пониженных напряжениях на фазах обмотки статора предусмотрен только без нагрузки, т. е. при выключенной обмотке возбуждения тормоза. Во избежание повреждения приборов комплекта К-50 до нажатия кнопки «Вп» («Вперед») переключатель А предела измерения тока следует поставить в позицию, соответствующую току 50 А при пуске с номинальными фазными напряжениями, или в позицию, соответствующую току 25 А при пуске с пониженными напряжениями на фазах обмотки статора.

5.2. Частоту вращения вала двигателя в режиме холостого хода или при малых нагрузках нужно измерять с помощью стробоскопического устройства и секундомера, а при больших нагрузках — с помощью тахогенератора.

5.3. Режим нагрузки двигателя, работающего с номинальным фазным напряжением, начать с создания на его валу номинального момента, затем на несколько секунд перегрузить двигатель, создав момент, превышающий номинальный на 25%. После этого перевести двигатель в режим работы с частичной нагрузкой, например, при моментах, составляющих 0,75; 0,5; 0,25 от номинального. При работе двигателя с пониженными фазными напряжениями рекомендуется сначала создать на его валу момент, составляющий 0,4 от номинального, а затем уменьшить моменты, устанавливая их равными 0,3; 0,2 и 0,1 от номинального.

5.4. Для торможения двигателя достаточно нажать кнопку «Ст» («Стоп») магнитного пускателя.

5.5. Реверсирование ротора двигателя достигается путем нажатия кнопки «Нз» («Назад»). В условиях лабораторного эксперимента оно допустимо только для двигателя, вращающегося вхолостую при пониженных фазных напряжениях на обмотке статора.

5.6. Кривые зависимости тока статора, к. п. д. и коэффициента мощности от механической мощности двигателя, работающего при номинальных и пониженных фазных напряжениях на обмотке статора, построить на одном графике.

5.7. Рабочие участки механических характеристик по данным опытов согласно п. 3.2 и 3.4 рабочего задания изобразить на одном графике.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Какие графики называют рабочими характеристиками трехфазных асинхронных двигателей?

6.2. Какова частота вращения основного магнитного поля испытуемого двигателя и с какой частотой изменяется ток в обмотке его ротора при номинальной нагрузке?

6.3. Почему относительная величина тока холостого хода трехфазного асинхронного двигателя больше, чем трехфазного трансформатора той же мощности?

6.4. Почему начальный пусковой ток двигателя с короткозамкнутым ротором превышает номинальный в  $5 \div 6$  раз, а начальный пусковой момент только в  $1,5 \div 2$  раза больше номинального?

6.5. Какой относительный начальный пусковой момент создает испытуемый двигатель при подаче на фазы обмотки статора напряжений, меньших номинального в  $\sqrt{3}$  раз?

6.6. Какие величины называют к. п. д. и коэффициентом мощности трехфазного асинхронного двигателя? Как их определяют по показаниям измерительных приборов?

6.7. Почему при работе испытуемого двигателя с частичной нагрузкой его коэффициент мощности и к. п. д. увеличиваются при снижении напряжений на фазах обмотки статора?

6.8. Поясните работу элементов реверсивного магнитного пускателя.

6.9. Как пользоваться измерительным комплектом К-50?

## **VII. ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **П 18.1. Трехфазный реверсивный магнитный пускатель**

Магнитный пускатель представляет собой комплект релейно-контакторной аппаратуры, осуществляющей с помощью трехкнопочной станции дистанционное включение в сеть и отключение от сети рабочей обмотки трехфазного асинхронного двигателя или изменение направления вращения его ротора (ре-

версирование). Кроме того, эта аппаратура защищает двигатель от длительных перегрузок и от значительных снижений амплитуд линейных напряжений.

Схема соединений элементов аппаратуры трехфазного реверсивного магнитного пускателя с кнопочной станцией, а также с выводами обмотки статора двигателя и трехполюсного автомата сети АС-1 изображена на рис. 18.2.

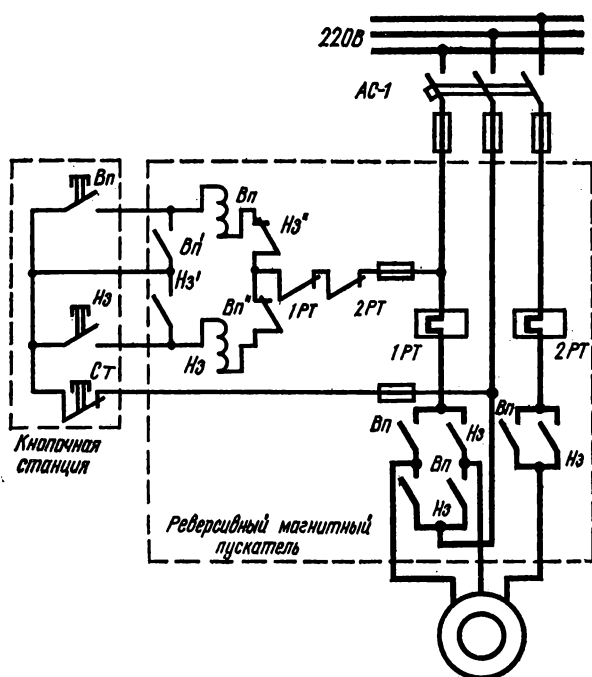


Рис. 18.2

Магнитный пускатель состоит из двух трехполюсных контакторов «Вп» («Вперед») и «Нз» («Назад») и двух тепловых реле 1РТ и 2РТ.

Каждый контактор («Вп» или «Нз») имеет три главных замыкающих контакта, один замыкающий («Вп'» или «Нз'») и один размыкающий («Вп''» или «Нз''») блок-контакты.

Два главных контакта контактора «Вп» и два главных контакта контактора «Нз» соединены по схеме четырехплечего моста, что обеспечивает возможность пересоединения двух выводов обмотки статора с двумя линейными проводами сети, а следовательно, и возможность изменения направления вращения основного магнитного поля двигателя и его ротора.

Замыкающие блок-контакты «Вп'» и «Нз'» при срабатывании шунтируют кнопки «Вп» или «Нз», а размыкающие блок-контакты «Вп''» и «Нз''» выполняют роль элементов блокировки: они исключают возможность одновременного срабатывания контакторов «Вп» и «Нз».

Каждое тепловое реле (1РТ или 2РТ) снабжено размыкающим контактом, а его обмотка представляет собой проволочную спираль, нагреваемую током в линейном проводе.

Кнопочная станция состоит из двух кнопок («Вп» и «Нз») с самовозвратом и замыкающим контактом и одной кнопки «Ст» («Стоп») тоже с самовозвратом, но с размыкающим контактом.

Действие элементов магнитного пускателя при включении в сеть автомата АС-1 происходит в такой последовательности. Нажимают кнопку «Вп» и замыкают цепь, состоящую из последовательно соединенных двух контактов тепловых реле, блок-контакта «Нз», кнопки «Ст» и обмотки контактора «Вп». Под действием линейного напряжения в обмотке контактора «Вп» возникает ток и контактор срабатывает: три его главных контакта «Вп» и блок-контакт «Вп» будут замкнуты. Кнопку «Вп» отпускают без опасения разомкнуть цепь обмотки контактора «Вп». После замыкания главных контактов контактора «Вп» обмотка статора будет включена в сеть с прямым чередованием линейных напряжений, и ротор двигателя придет во вращение.

Для торможения двигателя достаточно нажать кнопку «Ст», что приведет к разрыву цепи обмотки контактора «Вп» и отключению обмотки статора двигателя от сети вследствие размыкания линейных проводов главными контактами.

Для изменения направления вращения ротора достаточно нажать кнопку «Нз», так как после замыкания главных контактов контактора «Нз» обмотка статора будет включена в сеть с обратным чередованием линейных напряжений.

При длительной перегрузке двигателя линейные токи нагревают обмотки тепловых реле, которые срабатывают и размыкают своими контактами цепь обмоток контакторов «Вп» или «Нз».

При недопустимом уменьшении амплитуды линейных напряжений сети, вызывающих ослабление основного поля двигателя, контакторы «Вп» или «Нз» размыкают свои главные контакты, обмотка двигателя отключается от сети и его ротор останавливается. Такой же эффект вызовет временное исчезновение линейных напряжений сети. Однако при последующем восстановлении напряжений самозапуск двигателя будет исключен. Его пуск во всех случаях возможен только с помощью кнопочной станции.

## П 18.2. Стробоскопическое устройство

Устройство состоит из укрепленного на торце вала машины диска со стрелкой и газоразрядной лампы ГЛ с генератором Г прямоугольных импульсов, следующих с частотой сети  $f$ , которые подаются на лампу при нажатой кнопке «Строб» («Стробоскоп») (см. рис. 18.1).

Если диск освещать вспышками, частота которых равна частоте вращения диска, то стрелка будет казаться неподвижной, а при несколько меньшей частоте вращения диска — медленно вращающейся (в обратную сторону).

Кажущаяся частота вращения стрелки равна частоте скольжения ротора. Число стрелок-радиусов равно числу пар  $p$  полюсов машины. Сосчитав число оборотов  $k$  какой-либо стрелки за любой интервал времени  $t$ , определенный по секундомеру, можно определить скольжение:

$$s = kp/ft$$

и истинную частоту вращения ротора:

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s).$$

## П 18.3. Измерительный комплект К-50

Комплект К-50 предназначен для измерения фазных напряжений, токов и мощностей в трехфазных трех- и четырехпроводных цепях. Комплект состоит из амперметра, многопредельного вольтметра, однофазного ваттметра и многопредельного трансформатора тока, включаемых поочередно в цепь с искусственной нейтралью.

Пределы измерения тока с помощью трансформатора тока: 1; 2,5; 5; 10; 25; 50 А. Их устанавливают переключателем А (рис. 18.3). Пределы измерения фазных напряжений вольтметром: 150; 300; 450; 600 В. Их устанавливают переключателем В.

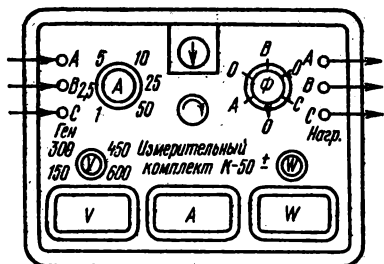


Рис. 18.3

Очередность включения приборов в фазы *A*, *B* и *C* определяют установкой четырехпозиционного переключателя «Ф». При установке переключателя в позицию *O* последовательные обмотки приборов оказываются замкнутыми, а вольтметр отключен.

Мощность трехфазных устройств определяют как алгебраическую сумму показаний ваттметра при установке переключателя «Ф» в позиции *A*, *B* и *C*:

$$P = \pm P_A \pm P_B \pm P_C.$$

Ваттметр имеет 150 делений, а для определения знака его показаний он снабжен переключателем «W».

Во избежание повреждения амперметра и ваттметра значительными токами (при пуске, реверсировании, перегрузках) необходимо сразу после отсчета показаний этих приборов переключатель «Ф» установить в позицию *O*.

## Работа № 19

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ЕСТЕСТВЕННАЯ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать влияние момента сопротивления на скорость вращения ротора, токи в фазах обмотки статора и энергетические показатели работы двигателя при замкнутых накоротко контактных кольцах; изучить взаимодействие аппаратуры автоматического управления процессом пуска и защиты двигателя с фазным ротором.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытывается трехфазный асинхронный двигатель с контактными кольцами типа АК-51-4 с повышенным скольжением, предназначенный для использования в крановых механизмах. Номинальные данные двигателя: 2,8 кВт; 220 В; 50 Гц; 1370 об/мин; 11,5 А;  $\eta = 78\%$ ;  $\cos\phi = 0,82$ ;  $E_2 = 84$  В;  $I_{2н} = 22,5$  А. Кратность пускового момента 1,3 (с реостатом в цепи ротора), кратность пускового тока 3, кратность максимального момента 2,2. Фазы обмотки статора соединены треугольником.

Приборная панель стенда с мнемонической схемой машин и аппаратов изображена на рис. 19.1.

К трехпроводной трехфазной сети 220 В подключен автоматический трехполюсный выключатель АС-1 (автомат сети).

Обмотку статора соединяют с выводами автомата сети и отсоединяют от них посредством магнитного пускателя с кнопками «Пуск» и «Стоп» (см. приложение П 19.1 и схему рис. 19.2).

На стенде установлены два пусковых трехфазных реостата. Мнемоническая схема одного из них дана на приборной панели. Он установлен на раме рядом с двигателем и снабжен рычагом, поворачиваемым вручную из позиции «Стоп» в позицию «Ход». Другой реостат предназначен для автоматического управления процессом пуска с помощью релейно-контакторной аппаратуры, размещенной на отдельной панели (см. приложение П 19.2 и схему рис. 19.3).

Для включения в цепь того или иного реостата используют трехполюсный переключатель, установленный в левом углу панели стенда. Его тумблер может быть установлен в позицию «Автом.» (автоматизированный реостатный пуск) или «Ручн.» (ручной реостатный пуск).

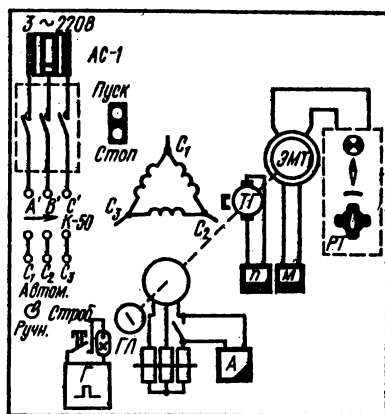


Рис. 19.1

Нагрузкой двигателя служит электромагнитный тормоз ЭМТ, снабженный измерителем момента (см. приложение П 16.1 и схему рис. 16.2).

Измерители частоты вращения ротора (магнитоэлектрический тахогенератор ТГ и стробоскопическое устройство, включаемое кнопкой «Строби»), а также комплект приборов для измерения фазных токов, напряжений и активной мощности (К-50) те же, что и для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (см. приложения П 18.2 и П 18.3).

Ультранизкую частоту токов в роторе при холостом ходе двигателя можно измерить с помощью включенного в цепь ротора амперметра А магнитоэлектрической системы с двусторонней шкалой, отсчитывая колебания его стрелки за известный интервал времени.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода двигателя. Пуск двигателя сначала произвести при помощи реостата с ручным управлением под контролем величины тока в линейных проводах. Затем остановить двигатель и произвести его автоматизированный пуск, фиксируя величины токов в моменты отключения секций пускового реостата. Измерить частоту тока в обмотке ротора, величину тока в обмотке статора и коэффициент мощности двигателя в режиме холостого хода.

3.2. Осуществить режим нагрузки двигателя и измерить величины, необходимые для построения рабочего участка механической ес-

тестовой характеристики, а также кривых зависимости тока в обмотке статора, коэффициента мощности и к. п. д. двигателя от его полезной механической мощности.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. По [1, глава 23 «Элементы электропривода»] и приложениям П 19.1 и П 19.2 изучить взаимодействие реле и контакторов системы защиты и управления в процессах автоматического пуска, торможения, а также при перегрузке и аварийных состояниях двигателя.

4.2. Руководствуясь рис. 19.1 и приложением П 18.3, изобразить схему включения комплекта измерительных приборов К-50.

4.3. Записать формулу для расчета коэффициента мощности двигателя по показаниям приборов, установленных на стенде.

4.4. Привести формулы для расчета частоты вращения вала двигателя, измеряемой с помощью стробоскопического устройства и секундомера.

4.5. Составить перечень операций, необходимых для испытания двигателя в режиме холостого хода с ручным и автоматизированным реостатным пуском.

4.6. Руководствуясь решением задачи 11.3 в [2], рассчитать по паспортным данным испытуемого двигателя его номинальный момент.

4.7. Записать формулы для расчета к. п. д. по показаниям измерительных приборов, установленных на испытательном стенде.

4.8. Начертить примерный вид механической естественной характеристики двигателя, определив предварительно величины максимального и пускового моментов по данным каталога.

Критическое скольжение рассчитать по формуле

$$s_{кр} = s_H \left[ \frac{M_{max}}{M_{ном}} + \sqrt{\left( \frac{M_{max}}{M_{ном}} \right)^2 - 1} \right].$$

4.9. Составить перечень операций, необходимых для испытания двигателя в режиме нагрузки.

4.10. Подготовить таблицу для записи результатов испытания двигателя под нагрузкой в соответствии с п. 3.2 рабочего задания.

4.11. Заготовить миллиметровую бумагу размером 100 × 100 мм для построения характеристик, предусмотренных п. 3.2 рабочего задания. Нанести координатные оси со шкалами соответствующих величин.

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Пуск двигателя в условиях лабораторного эксперимента предусмотрен без нагрузки, т. е. при отключенной обмотке возбуждения тормоза. До нажатия кнопки «Пуск» переключатель тока в комплекте

К-50 следует поставить в позицию, соответствующую току 50 А, а амперметр с двусторонней шкалой в цепи ротора замкнуть накоротко.

5.2. Частоту и скорость вращения ротора при малых нагрузках следует измерять с помощью стробоскопической установки и секундомера, а при нагрузках, близких к номинальной, — с помощью тахогенератора.

5.3. Режим нагрузки двигателя необходимо начать с создания на его валу номинального момента, а затем перевести двигатель в режим работы с моментами, составляющими, например, 75, 50 и 25 % от номинального.

5.4. Для останова двигателя достаточно нажать кнопку «Стоп» магнитного пускателя.

5.5. Кривые зависимости тока в обмотке статора, к. п. д. и коэффициента мощности от механической мощности двигателя построить на одном графике.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Какие графики называют рабочими характеристиками трехфазных асинхронных двигателей?

6.2. С какой частотой изменяется ток в обмотке ротора исследуемого двигателя при номинальной нагрузке?

6.3. Почему допустимо включение в цепь ротора двигателя, работающего в режиме холостого хода, амперметра магнитоэлектрической системы с двусторонней шкалой?

6.4. Каково назначение пускового реостата в цепи ротора асинхронного двигателя и в цепи якоря двигателя постоянного тока?

6.5. Из каких элементов собрана автоматизированная система релеинно-контакторного управления процессом пуска двигателя с контактными кольцами? В какой последовательности они работают?

6.6. Поясните принцип действия стробоскопической установки для измерения частоты вращения вала испытуемого двигателя.

6.7. Как зависит критическое скольжение асинхронного двигателя с контактными кольцами от величины сопротивления трехфазного реостата в цепи его ротора?

6.8. Как по показаниям приборов измерительного комплекта К-50 определить коэффициент мощности двигателя?

6.9. Показания каких приборов, установленных на стенде, следует использовать при определении к. п. д. двигателя?

## **VII. ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **П 19.1. Нерезервированный магнитный пускатель**

Трехфазные асинхронные двигатели малой и средней мощности обычно устанавливают совместно с магнитным пускателем и кнопочными станциями.

Магнитный пускатель представляет собой комплект (рис. 19.2) из одного контактора, называемого линейным (с тремя главными  $L$  и блокировочным  $L'$  замыкающими контактами), и двух реле максимального тока (с размыкающими контактами  $1MT$  и  $2MT$ ), заключенных в металлический шкаф.



Кнопочная станция состоит из замыкающей кнопки с самовозвратом «Пуск» и размыкающей кнопки «Стоп», тоже с самовозвратом. С магнитным пускателем кнопочная станция соединена трехпроводной линией связи.

Магнитный пускатель включают в трехфазную трехпроводную сеть с помощью автоматического трехполюсного выключателя АС-1 (автомат сети), а отводы трех главных контактов  $\mathcal{L}$  линейного контактора соединяют с выводами фаз обмотки статора асинхронного двигателя.

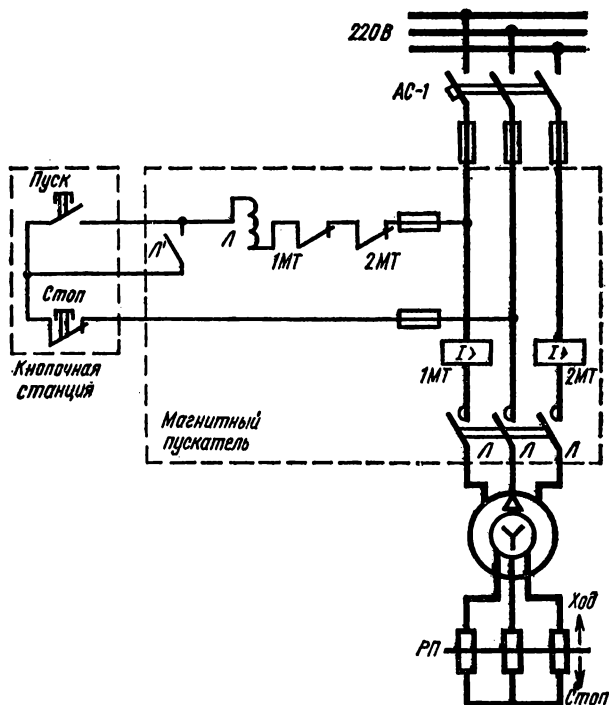


Рис. 19.2

Следует иметь в виду, что автомат сети АС-1 не рассчитан на отключение обмотки статора двигателя, работающего под нагрузкой. Для этой цели служит магнитный пускатель. Кроме того, магнитный пускатель осуществляет защиту обмотки статора двигателя от перегрева токами при перегрузках, а также исключает возможность повторного самозапуска двигателя при внезапном исчезновении и последующем восстановлении напряжений трехфазной сети.

Для включения обмотки статора в сеть необходимо сначала включить автомат сети АС-1, а затем нажать кнопку «Пуск». Тогда обмотка линейного контактора окажется под напряжением и его главные контакты  $\mathcal{L}$  и блок-контакт  $\mathcal{L}'$  замкнутся.

Кнопка «Пуск» будет зашунтирована блок-контактом  $\mathcal{L}'$  и ее можно будет отпустить, а выводы обмотки статора с помощью главных контактов линейного контактора будут присоединены к зажимам автомата сети АС-1.

Для отключения обмотки статора от сети достаточно нажать кнопку «Стоп», что приведет к отпусанию линейного контактора и размыканию его контактов.

Длительная перегрузка двигателя приводит к срабатыванию реле максимального тока и размыканию его контактов 1MT и 2MT в цепи обмотки линейного контактора, а следовательно, к отключению обмотки статора от сети.

К тому же результату приводит значительное снижение амплитуды или полное исчезновение напряжения сети, вызывающие отпускание линейного контактора и размыкание всех его контактов.

После восстановления напряжения сети самозапуск двигателя будет невозможен: для пуска двигателя необходимо вновь нажать кнопку «Пуск».

## П 19.2. Автоматизированный реостатный пуск двигателя в функции времени

Как отмечалось, кроме пускового реостата с ручным управлением, на отдельном стенде расположен комплект резисторных элементов, образующих симметричный трехфазный пусковой реостат, соединенный звездой (по два элемента на фазу) и управляемый автоматически при помощи релейно-контакторной аппаратуры.

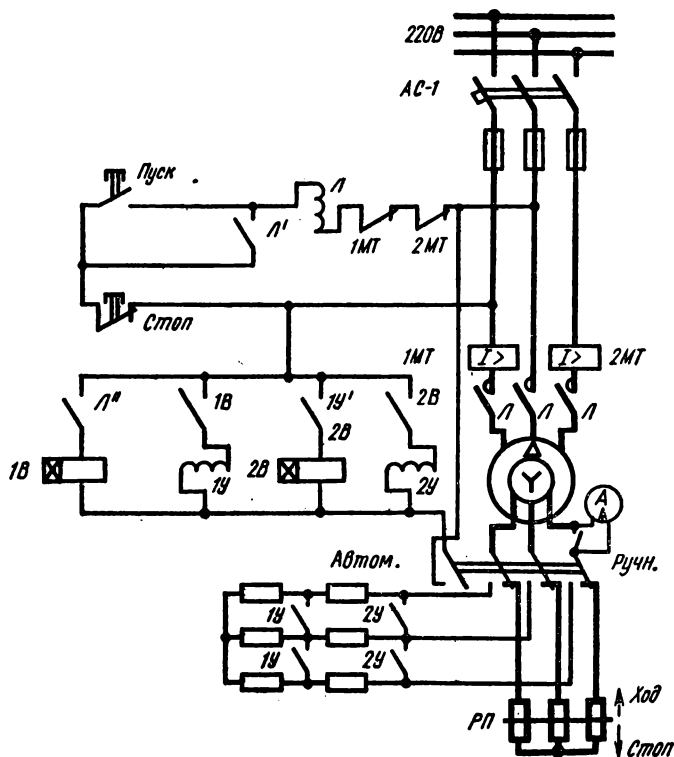


Рис. 19.3

Схема соединения обмоток и контактов этой аппаратуры с магнитным пускателем и секциями пусковых резисторов изображена на рис. 19.3. Там же изображен двухпозиционный (позиции «Ручн.» и «Автом.») многополюсный переключатель, присоединяющий обмотку ротора либо к пусковому реостату с ручным управлением, либо к пусковым резисторам с автоматизированным управлением.

Из рассмотрения условных стандартных графических обозначений реле и контакторов можно заключить, что здесь применены два реле с выдержкой време-

ни замыкающих (с замедлением) контактов  $1B$  и  $2B$  при срабатывании и два контактора (контакты ускорения) с двумя главными  $1U$  и  $2U$  и одним блокировочным  $1U'$  замыкающими контактами.

Автоматизированная система двухступенчатого реостатного пуска двигателя в функции времени действуют в такой последовательности.

Сначала ставят тумблер переключателя в позицию «Автом.» и включают автомат АС-1 сети. Затем нажимают кнопку «Пуск». Магнитный пускатель срабатывает и присоединяет обмотку статора к выводам автомата сети АС-1. В магнитной цепи машины возбуждается вращающееся магнитное поле и на его ротор вследствие полностью введенных трехфазных секций пусковых резисторов будет действовать максимальный вращающий момент. Одновременно с замыканием главных контактов  $L$  линейного контактора его второй блок-контакт  $L''$  также замкнется и сработает реле времени  $1B$ . С известной выдержкой времени его контакт  $1B$  замкнется, сработает контактор первой ступени ускорения  $1U$  и своими главными контактами  $1U$  отключит первую секцию пусковых резисторов. К этому времени двигатель увеличит скорость, а его вращающий момент уменьшится. Срабатывание контактора  $1U$  повлечет одновременное замыкание блок-контакта  $1U'$  и сработает второе реле времени, которое замкнет свой контакт тоже с известной выдержкой времени. В момент срабатывания контактора первой ступени ускорения вращающий момент скачкообразно возрастет и скорость вращения ротора (с новым ускорением) будет продолжать нарастать. При замыкании контактов  $2B$  реле времени второй ступени сработает контактор ускорения, а его главные контакты  $2U$  полностью отключат все пусковые резисторные элементы в цепи ротора. Вращающий момент, действующий на ротор, и его скорость вновь возрастут до тех пор, пока противодействующий и вращающий моменты не станут равными друг другу. Тогда изменение скорости и пусковой процесс прекратятся, т. е. ротор станет вращаться с постоянной скоростью.

При нажатии кнопки «Стоп» пусковые резисторы вновь полностью будут введены в цепь ротора.

## **Работа № 20**

### **УГЛОВАЯ И U-ОБРАЗНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить влияние величин вращающего момента на валу и постоянного тока в обмотке возбуждения на переменный ток в фазе обмотки статора и мощность трехфазного синхронного генератора, работающего в энергосистеме.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Испытывается трехфазный синхронный генератор с электромагнитным возбуждением типа ГАБ-2-Т-230, предназначенный для работы с двигателем внутреннего сгорания. Номинальные данные генератора 2 кВт; 220 В; 50 Гц; 3000 об/мин;  $I_1 = 6,25$  А;  $\cos\varphi = 0,8$ ;  $I_2 = 6$  А.

Приборная панель стенда с мнемонической схемой машин и аппаратов показана на рис. 20.1.

При лабораторном исследовании ротор генератора приводится во вращение двигателем постоянного тока типа П-31 с независимым возбуждением. Номинальные данные электродвигателя: механическая мощность 3,2 кВт; напряжение 110 В; ток якоря 35,2 А, ток возбуждения 1,45 А; к. п. д. 83 %; частота вращения якоря 3000 об/мин. Для пуска двигателя на стенде установлен пусковой реостат ПР.

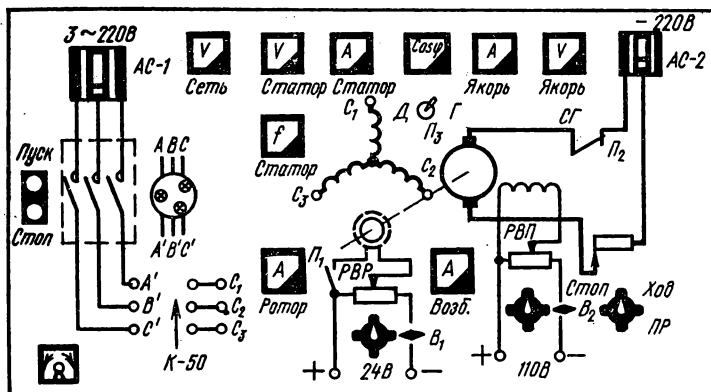


Рис. 20.1

Постоянный ток возбуждения двигателя можно изменять регулятором возбуждения полюсов РВП, содержащим потенциометр, включаемый в сеть 110 В с помощью пакетного переключателя  $B_2$ .

Постоянный ток возбуждения синхронного генератора можно изменять до 7,5 А регулятором возбуждения ротора РВР, содержащим потенциометр, включаемый в сеть 24 В с помощью пакетного переключателя  $B_1$ .

Фазы рабочей обмотки генератора соединены звездой. Ее включают в трехфазную сеть посредством магнитного пускателя, отличающегося от магнитного пускателя к трехфазному асинхронному двигателю с контактными кольцами (см. приложение П 19.1) лишь тем, что он содержит тепловые реле 1РТ и 2РТ, нормально замкнутые контакты которых находятся в цепи катушки линейного контактора Л (левая часть схемы рис. 20.2).

Для периодического измерения токов в фазах обмотки статора генератора и его активной мощности применяют комплект приборов типа К-50 (см. приложение П 18.2).

Для непрерывного измерения линейного напряжения величины и частоты тока в фазе обмотки статора, а также коэффициента мощности генератора на стенде установлены щитовые приборы с трансформатором тока и переключателем  $\Pi_3$  (см. правую часть рис. 20.2).

Для включения рабочей обмотки генератора в трехфазную сеть методом точной синхронизации на стенде установлен ламповый синхроскоп (см. приложение П 20.1).

Для измерения угла рассогласования между осью симметрии магнитного поля в зазоре машины и осью полюса возбуждения ротора на торце вала синхронной машины расположена стробоскопическая установка с двусторонней шкалой (см. приложение П 20.2).

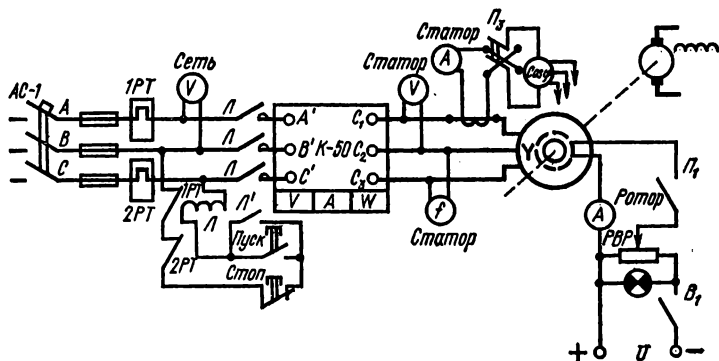


Рис. 20.2

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода трехфазного синхронного генератора при номинальной частоте вращения ротора и разомкнутых выводах обмотки статора. Определить зависимость э. д. с. в фазе обмотки статора от тока возбуждения. Построить характеристику холостого хода генератора.

3.2. Осуществить режим холостого хода трехфазного синхронного генератора с включенной в сеть обмоткой статора. Определить зависимость переменного тока в фазе обмотки статора от постоянного тока в обмотке ротора и построить соответствующую U-образную характеристику.

3.3. Осуществить режим нагрузки трехфазного синхронного генератора с включенной в сеть обмоткой статора:

а) определить и построить кривые зависимости тока в фазе обмотки статора и коэффициента мощности генератора от постоянного тока в обмотке ротора при вращающих моментах приводного двигателя, соответствующих активной мощности генератора 0,9 и 1,8 кВт;

б) определить и построить кривые зависимости активной мощности генератора от угла рассогласования при токах возбуждения 3,5 и 6 А.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Дополнить схему рис. 20.1 линиями, соединяющими комплект К-50 с выводами А, В, С магнитного пускателя и с выводами обмотки статора  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ .

4.2. Начертить упрощенную схему замещения одной фазы рабочей обмотки синхронного генератора.

4.3. Составить перечень операций и последовательность их выполнения на лабораторном стенде при включении обмотки статора генератора в трехфазную сеть методом точной синхронизации. Указать способы контроля правильности выполнения каждой операции.

4.4. Подготовить таблицу для записи результатов испытания генератора в соответствии с п. 3.1 рабочего задания. Заготовить миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями, масштабными делениями и числовыми отметками, необходимыми для построения характеристики холостого хода.

4.5. Построить упрощенные векторные диаграммы недовозбужденного и перевозбужденного синхронного генератора в режиме холостого хода с включенной в сеть трехфазной обмоткой.

4.6. Записать формулу для расчета коэффициента мощности генератора по показаниям комплекта приборов К-50.

4.7. Начертить примерный вид угловых характеристик момента и активной мощности синхронного генератора и указать их рабочие участки.

4.8. Начертить примерный вид U-образных характеристик синхронного генератора, работающего в энергосистеме большой мощности, при отсутствии вращающего момента на валу и при моментах, составляющих 50 и 100% от номинального. Отметить на этом графике точку, соответствующую номинальной нагрузке.

4.9. Считая заданной U-образную характеристику, указать способ оценки коэффициента мощности генератора, работающего при известной величине постоянного тока возбуждения.

4.10. Составить перечень операций и последовательность их выполнения при осуществлении п. 3.3 а и б рабочего задания. Подготовить таблицы для записи результатов этих испытаний. Заготовить миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями и масштабными делениями, необходимыми для построения требуемых характеристик.

#### **У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Величину э. д. с. в режиме холостого хода генератора при разомкнутой обмотке статора измеряет вольтметр комплекта К-50, включенный на фазное напряжение. Переключатель вольтметра следует поставить в позицию 300 В.

5.2. При сборке цепи рабочей обмотки зажимы комплекта К-50, обозначенные А, В, С-ген., необходимо соединить с соответствующими гнездами трехфазной обмотки статора, а зажимы А, В, С-нагр. — с гнездами сети. Правильность чередования фаз линейных напряжений при этом проверяют по направлению вращения стрелки указателя.

5.3. Пуск приводного двигателя типа П-31 следует начать с подключения его обмотки возбуждения к источнику питания с регулятором РВП и создания в ней номинального тока. Затем при помощи автомата сети АС-2 включают цепь якоря с пусковым реостатом ПР в

двухпроводную сеть 110 В. Далее, следя за стрелкой амперметра в цепи якоря, нужно постепенно (за  $3 \div 5$  с) поворачивать ручку реостата *ПР* из положения «Стоп» в положение «Ход».

5.4. Останов приводного двигателя происходит в обратной последовательности: сначала ручку реостата *ПР* поворачивают из положения «Ход», в положение «Стоп», затем снимают напряжение с цепи якоря, отключая автомат АС-2. Последним отключают регулятор *РВП* от источника питания 110 В.

5.5. Скорость вращения якоря двигателя до включения обмотки генератора в трехфазную сеть можно регулировать изменением тока возбуждения двигателя. Контролировать момент достижения номинальной скорости вращения якоря можно стробоскопом.

5.6. Включение синхронного генератора на параллельную работу с системой большой мощности необходимо осуществить при помощи лампового синхроноскопа, предварительно поставив переключатель вольтметра в комплекте К-50 на позицию 150 В, а переключатель амперметра — на 10 А. После включения обмотки генератора в сеть следует совместить нуль шкалы стробоскопа со стрелкой, кажущейся неподвижной.

5.7. Управление величиной вращающего момента, создаваемого на валу генератора после включения обмотки его статора в трехфазную сеть, осуществляют регулированием постоянного тока в обмотке независимого возбуждения приводного двигателя: при уменьшении тока момент увеличивается (см. П 20.3). При изменении активной мощности генератора по показаниям ваттметра в комплекте К-50 следует учесть, что цена его деления равна 10 Вт/дел.

5.8. В случае неустойчивой работы недовозбужденного синхронного генератора токи статора могут резко возрасти. Во избежание повреждения комплекта К-50 его переключатель фаз сразу же после отсчета показаний следует поставить в позицию «0». Неустойчивую работу генераторов можно ликвидировать быстрым увеличением («форсированием») тока возбуждения ротора или уменьшением момента двигателя (путем увеличения постоянного тока в его обмотке независимого возбуждения); наконец, можно отключить генератор от сети и остановить двигатель, что потребует повторного включения в сеть.

5.9. U-образные характеристики синхронного генератора в режиме холостого хода и в режиме нагрузки построить на одном графике.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Чем определяется скорость вращения вала турбины, сочлененного с валом синхронного генератора, включенного в энергосистему большой мощности?

6.2. Каков порядок пуска и регулирования скорости вращения установленного на стенде приводного двигателя постоянного тока до включения обмотки статора генератора в сеть?

6.3. Каковы условия синхронизации и порядок включения синхронного генератора в трехфазную сеть?

6.4. Как определить максимальную активную мощность синхронного генератора, работающего в энергосистеме, по известному рабочему участку его угловой характеристики электромагнитного момента, соответствующей определенному току возбуждения?

6.5. Как в условиях лабораторного эксперимента изменить величину вращающего момента на валу синхронного генератора при включенной в сеть трехфазной обмотке статора?

6.6. Почему возникает и какими явлениями сопровождается неустойчивая работа синхронного генератора?

6.7. Как предотвратить выпадение синхронного генератора из синхронизма при начале неустойчивой работы?

6.8. Как изменить активную мощность синхронного генератора, работающего в энергосистеме?

6.9. Как изменить реактивную мощность синхронного генератора, работающего в энергосистеме?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 20.1. Ламповый синхроскоп

До включения исследуемого генератора в мощную трехфазную сеть (для параллельной работы с другими генераторами энергосистемы) необходимо, как известно [1, глава 20 «Трехфазные синхронные машины»], выполнить несколько предварительных процедур:

1) привести ротор генератора во вращение со скоростью, близкой к номинальной;

2) создать во вращающейся с номинальной скоростью обмотке возбуждения такой постоянный ток, при котором амплитуда э. д. с., индуцируемой в фазе разомкнутой обмотки статора, будет равна амплитуде фазного напряжения сети;

3) добиться синфазности (совпадения по фазе) линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  сети и напряжений  $U_{A'B'}$ ,  $U_{B'C'}$ ,  $U_{C'A'}$  между выводами  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  разомкнутой обмотки статора.

Для контроля за выполнением последней процедуры имеется несколько разновидностей приборов, одним из которых является ламповый синхроскоп, установленный на стенде. Он состоит из трех обычных сигнальных ламп накаливания, присоединенных к выводам главных контактов  $L$  линейного трехполюсного контактора в соответствии со схемой рис. 20.3.

После выполнения двух первых предварительных процедур и при разомкнутых главных контактах линейного контактора все три лампы будут одновременно периодически зажигаться и гаснуть с частотой, зависящей от разности угловой частоты  $\omega$  напряжения сети и угловой частоты  $\omega'$  э. д. с., индуцируемой в обмотке статора.

Сказанное поясняет изображенная на рис. 20.4 система вращающихся векторов фазных напряжений сети (сплошные стрелки) и совмещенная с ней система вращающихся векторов э. д. с., индуцируемых в фазах разомкнутой обмотки статора генератора (пунктирные стрелки). Отметим, что система векторов, изображенных сплошными стрелками, одновременно является диаграммой потенциалов ( $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ ) проводов сети по отношению к нейтрали идеального эквивалентного генератора сети, а система векторов, изображенных пунктирными

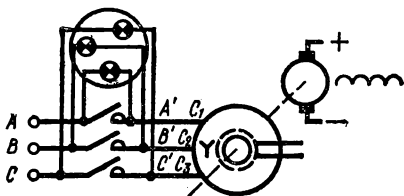


Рис. 20.3



ми стрелками, — диаграммой потенциалов выводов разомкнутой обмотки статора ( $V_A'$ ,  $V_B'$ ,  $V_C'$ ) относительно ее нейтрали.

С течением времени взаимное расположение этих двух систем векторов будет периодически изменяться, поскольку частоты напряжения сети и э. д. с. генератора в рассматриваемых условиях различны. Подобно стрелкам часов, обе системы векторов следует представлять себе вращающимися в одном направлении, но с разными угловыми скоростями. Если, например, для какого-то произвольного момента времени они расположены в соответствии с рис. 20.4,а, то для другого момента времени они могут расположиться в соответствии с рис. 20.4,б.

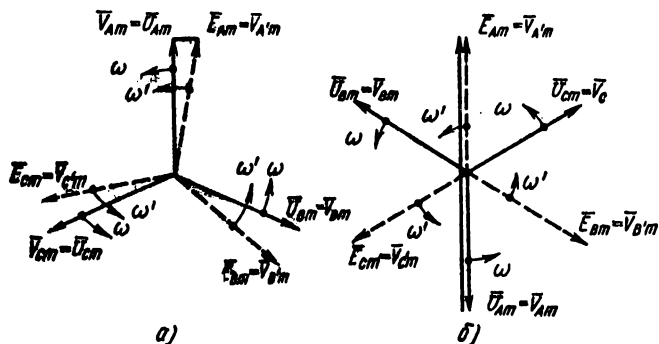


Рис. 20.4

Поскольку напряжение на каждой лампе синхроноскопа определяется разностью потенциалов мест ее присоединения к разомкнутому главному контакту линейного контактора, для оценки величины этого напряжения достаточно соединить прямыми линиями концы векторов, изображающих указанные потенциалы. На рис. 20.4,а и б они приведены только для лампы, присоединенной к линейному проводу А и к выводу  $C_1$  первой фазы разомкнутой обмотки статора. На двух других лампах картина распределения напряжений будет аналогичной. Из рассмотрения рис. 20.4 можно заключить, что в позиции рис. 20.4,а напряжения на всех трех лампах будут настолько малыми, что они одновременно погаснут, а в позиции рис. 20.4,б напряжения на лампах достигнут наибольшей величины (удвоенной амплитуды фазной э. д. с.). Так как в момент погасания ламп наступает синфазность напряжения сети и э. д. с. индуцируемой в обмотке статора, именно в этот момент нажимают на кнопку «Пуск», что приводит к срабатыванию линейного контактора и включению обмотки статора в трехфазную сеть без возникновения токов в линейных проводах и без механических толчков.

## **П 20.2. Установка для измерения углов рассогласования $\theta$ между осью симметрии магнитного поля в зазоре и осью полюса возбуждения**

Измерительная установка представляет собой такое же стробоскопическое устройство, какое применено для измерения скорости скольжения асинхронных двигателей (см. приложение П 18.2). Ее отличительная особенность состоит лишь в том, что на торце вала синхронной машины насажена одна стрелка, закрепленная в направлении оси полюсов ротора, а также в том, что эта стрелка при работе синхронной машины вращается перед неподвижной, но допускающей поворот на ограниченный угол двусторонней шкалой (с отметкой «0» посередине).

При номинальной скорости вращения вала синхронной машины закрепленная на нем стрелка, освещаемая импульсным источником света, будет казаться неподвижной.

После включения по методу точной синхронизации обмотки статора в сеть (см. приложение П 20.1), когда машина находится в режиме холостого хода и токи в линейных проводах отсутствуют, ось симметрии поля в зазоре и ось полюса возбуждения совпадают. В этом режиме шкалу стробоскопического устройства поворачивают в такое положение, при котором отметка «0» будет располагаться над концом стрелки, кажушейся неподвижной. Тогда мысленно проведенный луч из центра вала машины через деление шкалы с отметкой «0» будет соответствовать оси симметрии результирующего магнитного поля в зазоре.

При создании на валу синхронной машины внешнего момента (например, вращающего в режиме генератора или противодействующего в режиме двигателя) произойдет смещение оси полюса возбуждения ротора относительно оси магнитного поля в зазоре.

Вращающаяся с той же номинальной скоростью стрелка, освещаемая вспышками газоразрядной лампы стробоскопического устройства, теперь будет видна также неподвижной, но в новом положении по сравнению с исходным: она повернется на угол, равный углу рассогласования. Если в режиме генератора стрелка будет поворачиваться по движению часовой стрелки, то в режиме двигателя — в противоположную сторону.

### **П 20.3. О регулировании и определения величины момента, создаваемого машиной постоянного тока, сочлененной с синхронной машиной, включенной в мощную трехфазную сеть**

На лабораторном стенде ротор трехфазного синхронного генератора приводится во вращение двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

При разомкнутой обмотке статора генератора или при работе генератора на автономную нагрузку скорость вращения сочлененных валов обеих машин определяется скоростью вращения якоря двигателя.

После включения обмотки статора генератора в мощную трехфазную сеть скорость вращения  $\Omega$  сочлененных валов машин будет определяться скоростью вращения  $\Omega_0$  ротора синхронного генератора, т. е. она будет неизменной как в режиме холостого хода, так и в режиме нагрузки.

В этих условиях для изменения величины и знака момента на валу синхронной машины достаточно изменить величину тока возбуждения машины постоянного тока. Тогда и магнитный поток возбуждения  $\Phi_0$  машины постоянного тока, и э. д. с.  $E$ , индуктируемая в параллельной ветви обмотки ее якоря, соответственно увеличатся или уменьшатся:

$$E = k_E \Omega_0 \Phi_0.$$

При неизменной величине постоянного напряжения  $U$  между щетками коллекторной машины, работающей в режиме двигателя, постоянный ток в обмотке якоря с сопротивлением  $r$

$$I_a = \frac{U - E}{r} = \frac{U - k_E \Omega_0 \Phi_0}{r}.$$

Из этого следует, что уменьшение тока возбуждения двигателя постоянно тока приводит к уменьшению э. д. с. обмотки его якоря, а следовательно, к увеличению тока якоря и вращающего электромагнитного момента. Увеличением потока возбуждения машины постоянного тока э. д. с. обмотки якоря можно сначала сделать равной напряжению между щетками машины (тогда на ротор синхронной машины не будет действовать внешний момент и она перейдет в режим холостого хода); затем ток в обмотке якоря, а следовательно, и момент на валу изменят свои направления на обратные. На валу синхронной машины станет действовать противодействующий вращению момент, что соответствует изменению режимов машин: синхронная трехфазная машина будет работать в режиме двигателя, а коллекторная машина постоянного тока, включенная в сеть с неизменным постоянным напряжением, — в режиме генератора.

Для определения электромагнитного момента  $M$  трехфазной  $2p$ -полюсной синхронной машины, включенной в трехфазную сеть с частотой  $f$ , необходимо знать величину ее электромагнитной мощности:

$$P_{эм} = Q_0 M = \frac{2\pi f}{p} M.$$

Электромагнитная мощность  $P_{эм}$  в режиме генератора больше (а в режиме двигателя меньше) измеренной комплектом К-50 активной мощности  $P$  синхронной машины на величину мощности электрических и магнитных потерь.

Мощность магнитных потерь  $p_m$  в магнитопроводе статора (на перемагничивание и вихревые токи) постоянна при всех режимах, так как амплитуда и частота напряжений сети неизменны.

Мощность электрических потерь  $p_э$  пропорциональна квадрату действующего значения тока в фазе обмотки статора, т. е. изменяется пропорционально квадрату коэффициента загрузки  $\beta = I/I_{ном}$ :

$$p_э = \beta^2 p_{э, ном},$$

где  $p_{э, ном}$  — мощность электрических потерь при номинальном токе.

Таким образом, для режима генератора

$$P_{эм} = Q_0 M_{пр} = P + p_m + \beta^2 p_{э, ном},$$

а для режима двигателя

$$P_{эм} = Q_0 M_{вр} = P - p_m - \beta^2 p_{э, ном}.$$

## Работа № 21

### РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

#### I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать возможность использования трехфазного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением в качестве генератора реактивной энергии, ознакомиться с асинхронным пуском синхронного двигателя и определить влияние тока в его обмотке возбуждения на устойчивость работы и ток в фазе обмотки статора при нагрузке.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Приборная панель стенда с мнемонической схемой машин и аппаратов изображена на рис. 21.1.

Исследуется трехфазная двухполюсная синхронная машина с электромагнитным возбуждением типа ГАБ-2-Т-230, рассчитанная для работы в качестве генератора. Поэтому данные на паспортной табличке машины не соответствуют ее работе в режиме двигателя.



Измерение фазных токов и напряжений обмотки статора двигателя, а также его активной мощности осуществляется комплектом измерительных приборов типа К-50 (см. приложение П 18.3).

Для измерения угла рассогласования между осью результирующего магнитного поля в зазоре и осью полюсов ротора синхронного двигателя служит стробоскопическое устройство с двусторонней шкалой (см. приложение П 20.2).

### **III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ**

3.1. Осуществить режим холостого хода синхронного двигателя (режим синхронного компенсатора) и установить зависимость тока в фазе обмотки статора от тока возбуждения. Построить соответствующую U-образную характеристику.

3.2. Осуществить режим нагрузки синхронного двигателя при неизменном постоянном токе в его обмотке возбуждения, равном номинальному, и установить зависимость действующего значения переменного тока в фазе обмотки статора, активной мощности, коэффициента мощности и угла рассогласования от механической мощности двигателя. Построить соответствующие характеристики. По данным опыта рассчитать максимальный момент и построить угловую характеристику электромагнитного момента синхронного двигателя.

3.3. Осуществить режим нагрузки синхронного двигателя при неизменных моментах сопротивления на валу, равных 50 и 100% от номинального, и установить зависимость тока в фазе обмотки статора от тока в обмотке возбуждения. Построить соответствующие U-образные характеристики.

### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Дополнить схему рис. 21.1 условными обозначениями проводов, соединяющих измерительный комплект К-50 с обмоткой статора и с магнитным пускателем. Особое внимание обратить на маркировку зажимов комплекта К-50, обозначенных буквами А, В, С-ген. и А, В, С-нагр.

4.2. В соответствии с разд. V данного руководства составить перечень операций и требуемую последовательность их выполнения при осуществлении асинхронного пуска синхронного двигателя.

4.3. По номинальным данным двигателя рассчитать его номинальный вращающий момент на валу.

4.4. Руководствуясь приложением П 20.2, составить расчетный формуляр для определения по данным каталога и показаниям приборов величин противодействующих моментов, создаваемых на валу синхронного двигателя генератором постоянного тока. Руководствуясь приложением П 20.3, составить перечень операций по осуществлению

режима нагрузки синхронного двигателя в соответствии с п. 3.2 и 3.3 рабочего задания.

4.5. Написать формулу для расчета коэффициента мощности синхронного двигателя по показаниям приборов комплекта К-50.

4.6. Заготовить таблицы и миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями и масштабными делениями для записи показаний приборов и построения кривых, предусмотренных рабочим заданием.

4.7. Начертить примерный вид U-образных характеристик синхронного двигателя, работающего в режимах, предусмотренных п. 3.1 и 3.3 рабочего задания, и отметить на них точки, соответствующие условиям его испытания по п. 3.2 задания.

4.8. Изобразить примерный вид угловой характеристики электромагнитного момента синхронного двигателя, работающего в условиях, предусмотренных п. 3.2 рабочего задания.

#### **У. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Измерительный комплект К-50 следует включить в цепь обмотки статора так, чтобы зажимы, обозначенные буквами *A*, *B*, *C*-ген., были соединены с гнездами сети, а зажимы *A*, *B*, *C*-нагр. — с гнездами обмотки статора. Переключатель предела тока поставить в позицию, соответствующую 25 А. Сразу после записи показаний приборов переключатель фаз поставить в позицию «0».

5.2. Перед пуском синхронного двигателя переключатели  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  необходимо поставить в позицию «ПД» или «СД», включить автомат сети АС-1; пакетный переключатель  $B_1$  включить, а пакетный переключатель  $B_2$  оставить в отключенном состоянии. Ручку регулятора РВР поставить в крайнее левое положение.

5.3. Для пуска двигателя сначала требуется нажать кнопку «Пуск» магнитного пускателя, а по достижении скорости вращения ротора, близкой к синхронной, переключить  $P_1$  из позиции «ПД» в позицию «Н» и установить ток в обмотке возбуждения синхронного двигателя примерно равным 3,5 А. После окончания процесса пуска ток возбуждения отрегулировать так, чтобы ток в обмотке двигателя был предельно малым.

5.4. Для останова двигателя следует нажать кнопку «Стоп» и выключить пакетный переключатель  $B_1$ .

5.5. Чтобы нагрузить синхронный двигатель, надо возбудить генератор постоянного тока, включив пакетный переключатель  $B_2$ . Величина тормозного момента, создаваемого генератором на валу двигателя, зависит от тока в обмотке возбуждения генератора, изменяемого при повороте ручки регулятора РВП.

5.6. При неустойчивой работе двигателя необходимо немедленно увеличить ток возбуждения двигателя и уменьшить ток возбуждения генератора постоянного тока.

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- 6.1. Как происходит асинхронный пуск синхронного двигателя?
- 6.2. При каких условиях синхронный двигатель работает в режиме синхронного компенсатора? Как его осуществить на лабораторном стенде?
- 6.3. Как можно воздействовать на величину момента сопротивления на валу двигателя, испытываемого на лабораторном стенде?
- 6.4. В чем заключается главная отличительная особенность работы перевозбужденного трехфазного синхронного двигателя от недо возбужденного?
- 6.5. Как регулируют коэффициент мощности синхронного двигателя, работающего с неизменной нагрузкой?
- 6.6. При каких условиях происходит выпадение синхронного двигателя из синхронизма и в чем оно проявляется?
- 6.7. Что надо сделать для предотвращения неустойчивой работы синхронного двигателя?
- 6.8. Как по известной U-образной характеристике оценить величину коэффициента мощности синхронного двигателя, работающего при заданных значениях тока возбуждения и момента?
- 6.9. Как по данным испытания синхронного двигателя в режиме нагрузки при постоянном токе возбуждения рассчитать максимальный электромагнитный момент? От каких величин зависит максимальный момент?

## **Работа № 22**

### **МЕХАНИЧЕСКИЕ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить влияние амплитуды управляющего напряжения на зависимости скорости вращения ротора, полезной механической мощности, действующих значений токов в двух фазах обмотки статора и к. п. д. от момента нагрузки на валу асинхронного исполнительного двигателя, работающего с нерегулируемым конденсатором в цепи фазы возбуждения.

## II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытывается двухфазный асинхронный двигатель типа АДП-362 с полым немагнитным ротором, смонтированный на специальной переносной панели, установленной на столе стэнда.

Основные данные двигателя: номинальная мощность 19 Вт; частота напряжения сети 50 Гц; номинальное напряжение фазы возбуждения 110 В; емкость конденсатора в фазе возбуждения 6,5 мкФ; номинальное напряжение фазы управления 110 В; минимальное напряжение

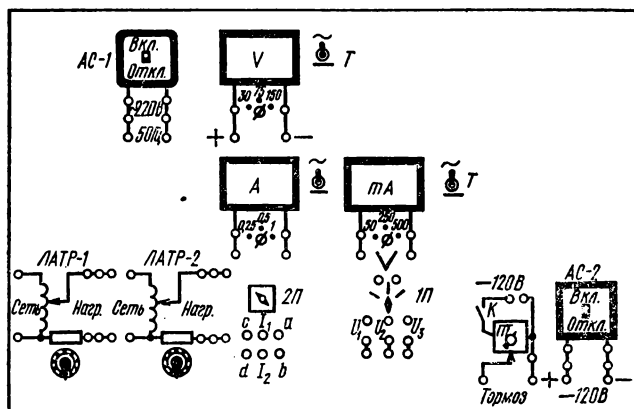


Рис. 22.1

фазы управления 1,5 В; номинальная частота вращения ротора 1750 об/мин; частота вращения ротора в режиме холостого хода 2650 об/мин; частота вращения осей прямой и инверсной составляющих основного поля 3000 об/мин; начальный пусковой момент при номинальных напряжениях на обеих фазах обмотки 1700 Г·см.

Лицевая сторона приборного щита стэнда с мнемонической схемой коммутационных и регулирующих аппаратов, необходимых для выполнения рабочего задания, изображена на рис. 22.1. В левом верхнем углу щита установлен автоматический выключатель АС-1 (автомат сети), соединенный с двухпроводной сетью переменного напряжения 220 В, 50 Гц, а в правом нижнем углу — автоматический двухполюсный выключатель АС-2, соединенный с сетью постоянного напряжения 120 В. Автоматические выключатели снабжены сигнальными лампами и реле максимального тока, срабатывающими при токах, превышающих 5 А. После срабатывания реле максимального тока и исчезновения напряжения между выходными зажимами выключателя его ручка остается в позиции «Вкл.». Для повторного включения автомата сети его ручку необходимо сначала поставить в позицию «Откл.», затем устранить неисправность и лишь после этого вновь перевести ручку в позицию «Вкл.».



Поскольку величина напряжения однофазной сети превышает допустимые напряжения на двух фазах исполнительного двигателя, для их раздельного регулирования на приборном щите установлены два одинаковых лабораторных автотрансформатора: ЛАТР-1 и ЛАТР-2. Они имеют следующие данные: первичное напряжение 220 В, диапазон изменения вторичного напряжения при повороте подвижного контакта  $0 \div 250$  В, предельно допустимый ток 2 А.

Принципиальная схема соединения лабораторных автотрансформаторов с выходными зажимами автомата сети АС-1 и цепями фаз возбуждения и управления обмотки статора двухфазного исполнительного двигателя (ДИД) представлена на рис. 22.2.

В качестве фазосдвигающего устройства в цепи фазы возбуждения служит установленный на столе станда комплект конденсаторов  $C$ , заключенных в корпус и допускающих параллельное соединение друг с другом при помощи тумблеров, расположенных на крышке корпуса.

Для нагрузки двигателя применен электромагнитный тормоз (ЭМТ)

системы МЭИ, смонтированный на переносной панели вместе с испытываемым двигателем (см. приложение П 22.1). Величина момента сопротивления, создаваемого тормозом, зависит от постоянного тока в обмотке возбуждения. Ток возбуждения электромагнитного тормоза регулируют с помощью установленного на приборном щите специального потенциометра  $ПТ$  (см. приложение П 22.2). Его присоединяют к выходным зажимам автомата сети постоянного напряжения АС-2 и к расположенным на переносной панели выводам  $T_1$  и  $T_2$  обмотки возбуждения тормоза.

Тормозное устройство имеет шкалу с числовыми отметками, соответствующими величинам создаваемых им моментов.

Для измерения частоты вращения вала двигателя на столе станда устанавливают строботаксметр типа СТ-МЭИ (см. приложение П 22.3, рис. 22.6), имеющий шнур с вилкой, включаемой в розетку двухпроводной сети переменного напряжения 220 В, 50 Гц.

На приборном щите имеются многопредельные вольтметр, амперметр и миллиамперметр магнитоэлектрической системы класса точнос-

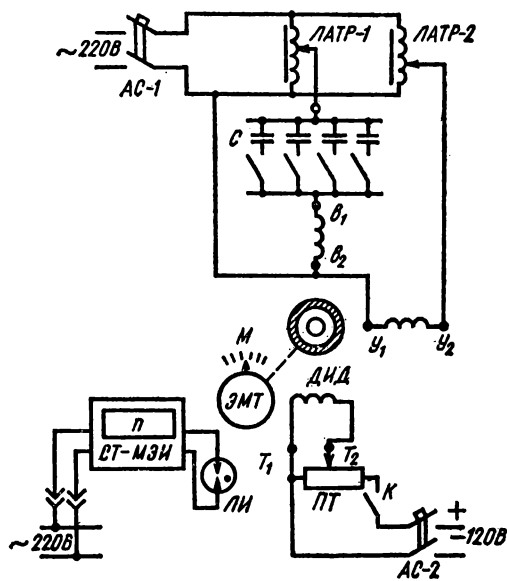


Рис. 22.2

ти 2,5 выпрямителем, пригодные для измерений в цепях как при постоянных, так и при переменных токах. Установка рода тока производится включением тумблера  $T$  в позицию « $\sim$ » (переменный ток) или «—» (постоянный ток). Вольтметр имеет пределы измерения 30; 75; 150 В.

Для измерений нескольких напряжений одним вольтметром применяют установленный на приборном щите переключатель  $1П$ , схема которого дана на рис. 22.3.

Пределы измерения амперметра 0,25; 0,5; 1 А, а миллиамперметра 50; 250; 500 мА.

Переключение пределов осуществляют с помощью многопозиционных переключателей, расположенных под приборами.

Для измерения активной мощности на столе стенда установлен переносной однофазный ваттметр. Его последовательную обмотку с помощью двухпозиционного безобрывного переключателя  $2П$ , смонтированного на приборном щите (см. рис. 22.1), включают сначала в цепь фазы возбуждения, а затем в цепь фазы управления (см. приложение П 22.4) (рис. 22.7).

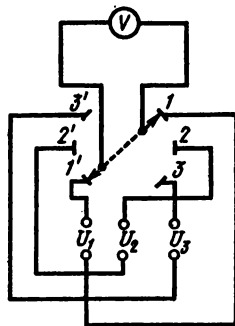


Рис. 22.3

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода испытуемого двигателя при номинальном напряжении на фазе управления. Измерить токи в фазах возбуждения и управления, напряжение на фазе возбуждения и частоту вращения вала. Остановить двигатель и изменить направление вращения его ротора.

3.2. Осуществить режим нагрузки испытуемого двигателя при номинальном напряжении на фазе управления. Установить зависимости частоты вращения ротора, напряжений на фазе возбуждения, токов и активных мощностей фаз управления и возбуждения от момента на валу. Построить механическую характеристику и графики зависимостей действующего значения напряжения на фазе возбуждения, полезной механической мощности, к. п. д., токов фаз управления и возбуждения от момента сопротивления.

3.3. Осуществить режим холостого хода при напряжении на фазе управления, пониженном в два раза по отношению к номинальному. Измерить токи в фазах возбуждения и управления, напряжение на фазе возбуждения, частоту вращения вала, а также начальный пусковой момент.

3.4. Осуществить режим нагрузки испытуемого двигателя при напряжении на фазе управления, пониженном в два раза по отношению к номинальному. Выявить зависимости частоты вращения ротора, полезной механической мощности, напряжения на фазе возбуждения, к. п. д., токов фаз управления и возбуждения от момента нагрузки. Построить механическую характеристику и соответствующие графики.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Руководствуясь основными техническими данными двигателя, рабочим заданием, рис. 22.3 и приложением П 22.4, составить полную схему включения в цепи двух фаз обмотки статора всех необходимых измерительных приборов вместе с автотрансформаторами, трехфазным вольтметровым переключателем 1П и безобрывным ваттметровым переключателем 2П. Около символов приборов проставить наибольшие значения измеряемых ими величин.

4.2. Руководствуясь [1] и [2], записать формулу для вычисления по основным техническим данным двигателя его номинального момента, а также формулы для расчета по показаниям измерительных приборов в режиме нагрузки двигателя его механической мощности и к. п. д.

4.3. Составить таблицу цен делений вольтметра, амперметра, миллиамперметра и ваттметра для всех возможных диапазонов измеряемых ими величин. В таблице указать тип и систему прибора, его класс точности и заводской номер.

4.4. В соответствии с рабочим заданием заготовить таблицы для записи показаний приборов на всех этапах эксперимента, а также для записи результатов расчета необходимых величин с учетом цен делений, вынесенных в таблицу, предусмотренную п. 4.3, а также рассчитанных по формулам, записанным в соответствии с п. 4.2.

4.5. Заготовить миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями, снабженными масштабными делениями и числовыми отметками откладываемых величин для построения графиков, предусмотренных рабочим заданием и п. 5.9.

4.6. По приложению П 22.3 усвоить правила пользования стробоскопом и методикой измерения частоты вращения вала двигателя.

4.7. Составить перечень операций, необходимых для выполнения каждого этапа рабочего задания.

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Перед сборкой электрических цепей, предусмотренных рабочим заданием, переключатели под каждым многопредельным измерительным прибором следует повернуть в позицию, соответствующую наибольшему конечному значению измеряемой величины, а тумблеры рода тока установить в позицию «~».

Подвижные контакты лабораторных автотрансформаторов расположить в исходной позиции, соответствующей отсутствию напряжения на вторичной стороне. Подвижный контакт потенциометра ПТ в цепи обмотки возбуждения электромагнитного тормоза до включения тумблера К поставить в положение, соответствующее отсутствию выходного постоянного напряжения, которое принимают за исходное.

5.2. Все электрические соединения измерительных приборов, пускорегулирующей аппаратуры и коммутирующих устройств с двух-

фазной обмоткой двигателя, конденсаторами, обмоткой возбуждения электромагнитного тормоза и автоматами сети (АС-1 и АС-2) следует осуществлять, руководствуясь предварительно составленными схемами.

5.3. При соединении гнезд безобрывного переключателя 2П с выводами двух фаз обмотки статора двигателя и зажимами обмоток ваттметра особое внимание следует обратить на требуемое схемой рис. 22.7 соответствие разметок их начал с расположением гнезд переключателя по отношению к автотрансформаторам, включаемым в однофазную сеть.

5.4. После включения комплекта конденсаторов в цепь фазы возбуждения требуемую паспортными данными величину их емкости обеспечивают параллельным соединением соответствующего числа конденсаторов с известной емкостью (установкой тумблеров).

5.5. Пуск двигателя начинают с включения автомата сети переменного напряжения АС-1 и перемещения подвижного контакта автотрансформатора ЛАТР-1 в цепи фазы возбуждения из исходного положения в позицию, при которой действующее значение вторичного напряжения этого автотрансформатора достигнет номинальной величины. Затем плавно перемещают подвижный контакт второго автотрансформатора (в цепи фазы управления), наблюдая за увеличением скорости вращения ротора двигателя.

5.6. Режим нагрузки двигателя осуществляют включением автомата сети постоянного напряжения АС-2 и установкой тумблера К в позицию «Вкл.». Затем плавно перемещают подвижный контакт потенциометра ПТ, регулирующего ток возбуждения электромагнитного тормоза, наблюдая по отклонению стрелки подвижной системы тормоза за величиной действующего на валу двигателя момента.

5.7. Для торможения двигателя достаточно снять напряжение на его фазе управления, чего достигают установкой подвижного контакта автотрансформатора ЛАТР-2 в исходное положение.

5.8. Для изменения направления вращения ротора двигателя достаточно простого пересоединения начала и конца фазы управления его обмотки с гнездами автотрансформатора ЛАТР-2.

5.9. Механические характеристики двигателя при напряжениях на фазе управления, составляющих 50 и 100% от номинального, построить совместно на одном графике. Зависимость механической мощности ротора и к. п. д. двигателя от момента на его валу при напряжениях на фазе управления, составляющих 50 и 100% от номинального, также построить совместно, но на другом графике. На третьем графике совместить кривые зависимости токов в обеих фазах обмотки и напряжений между выводами возбуждения от момента на валу при напряжениях на фазе управления, составляющих 50 и 100% от номинального.

5.10. По результатам эксперимента указать, при каких условиях полезная мощность двигателя будет наибольшей, и сравнить ее величину с номинальной; оценить к. п. д. двигателя при номинальной нагрузке.

## VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Как образуется вращающееся магнитное поле двигателя?
- 6.2. Будет ли работать двигатель, если закоротить конденсатор в цепи фазы возбуждения?
- 6.3. Почему для изменения направления вращения ротора двигателя достаточно простого пересоединения начала и конца фазы управления его обмотки с гнездами автотрансформатора ЛАТР-2?
- 6.4. В чем основное отличие механических характеристик асинхронного двухфазного двигателя с полым ротором от механических характеристик двухфазного конденсаторного двигателя с короткозамкнутым ротором?
- 6.5. Почему двухфазный асинхронный двигатель с полым ротором останавливается при снятии напряжения управления?
- 6.6. Почему у двухфазного двигателя с полым ротором к. п. д. ниже, чем у двухфазного конденсаторного двигателя с короткозамкнутым ротором?
- 6.7. Почему управление двигателем в лабораторном эксперименте названо амплитудно-фазовым, а не амплитудным?
- 6.8. Как измерить начальный пусковой момент двигателя?
- 6.9. Можно ли, изменяя только емкость конденсатора в цепи фазы возбуждения, получить круговое поле в двигателе с полым ротором при различных скоростях вращения?
- 6.10. Как измерить частоту вращения вала двигателя?

## VII. ПРИЛОЖЕНИЯ

### П 22.1. Электромагнитный тормоз для испытаний двигателей малой мощности

Для лабораторных испытаний двигателей малой мощности в режиме нагрузки в МЭИ была разработана и изготовлена серия миниатюрных электромагнитных тормозов. Общее представление об устройстве одного из них можно получить из рассмотрения рис. 22.4.

Основными конструктивными элементами тормоза являются статор и дисковый стальной ротор, приводимый во вращение исследуемым двигателем.

Статор состоит из двух частей: неподвижной стойки 1 и поворотной системы электромагнитов, расположенных по ободу диска 8. На поворотной части статора закреплен боковой щит 13 с центральным отверстием для подшипника 14, насаженного на вал 15. Стойка также имеет центральное отверстие для подшипника 7, который насажен на другой вал 4. Оба вала тормоза соосны.

На одном конце вала, который при испытании двигателя свободно вращается в подшипнике щита поворотной части статора, укреплен дисковый ротор 12 тормоза. Другой его конец сочленен с валом двигателя.

Второй вал тормоза необходим для обеспечения возможности поворота на ограниченный угол системы электромагнитов при изменении нагрузки на непрерывно вращающемся валу двигателя. В установившемся режиме, когда роторы тормоза и двигателя вращаются с постоянной скоростью, система электромагнитов должна быть неподвижной. Для этого на одном конце вала, который может поворачиваться в подшипнике стойки, укреплен поворотная часть статора, а на другом — груз 2; выполняющий роль противовеса.

Каждый электромагнит на поворотной части имеет П-образный магнитопровод 10, на котором расположены параллельно друг другу полюсные катушки

9, образующие обмотку возбуждения тормоза. Дискový ротор тормоза вращается между полюсными наконечниками 11 магнитопровода.

При разомкнутой обмотке возбуждения тормоза вращающийся ротор двигателя не будет испытывать механического противодействия со стороны ротора тормоза, что соответствует режиму холостого хода.

При подаче на выводы 16 обмотки возбуждения тормоза постоянного напряжения в ней возникает постоянный ток, создающий основное магнитное поле. Магнитные линии этого поля замыкаются по магнитопроводу с полюсными наконечниками, стальному диску ротора тормоза и по двум зазорам между дисковым ротором и полюсными наконечниками.

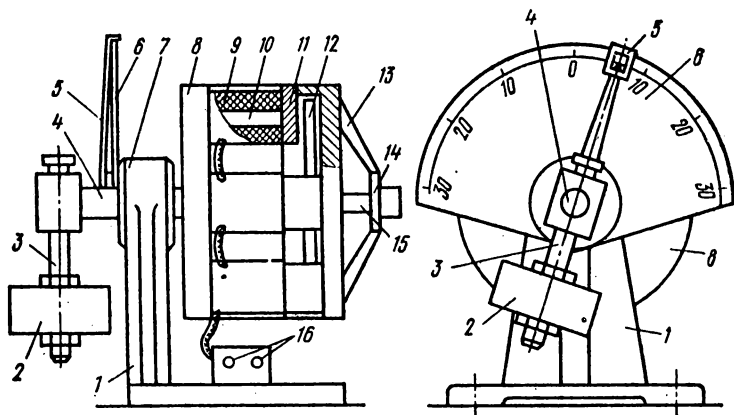


Рис. 22.4

Если при возбужденном тормозе ротор двигателя, а следовательно, и ротор тормоза приведен во вращение, то в стальном диске ротора тормоза наведутся вихревые токи. Взаимодействуя с постоянным магнитным полем электромагнитов, они создают на валу двигателя противодействующий момент, а на валу поворотной части статора — вращающий момент, увлекающий систему электромагнитов в сторону вращения ротора. Отклонение поворотной части статора ограничивает противодействующий момент груза, который пропорционален синусу угла отклонения оси подвеса 3 от вертикали. При равенстве вращающего и противодействующего моментов поворотная система статора придет в неподвижное состояние, что соответствует режиму нагрузки с неизменной скоростью вращения ротора двигателя.

Величину создаваемого тормозом момента плавно регулируют изменением величины постоянного тока возбуждения тормоза.

Для измерения созданного момента на валу поворотной части статора укрепляют стрелку 5, а к стойке прикрепляют шкалу 6 с числовыми отметками, соответствующими моменту (в Г·см).

Тормоз допускает измерение начального пускового момента; для этого при помощи стопорной шпильки достаточно временно механически скрепить дисковый ротор тормоза с поворотной частью статора и включить обмотку двигателя в сеть.

## **П 22.2. Потенциометрический регулятор тока возбуждения электромагнитного тормоза**

Как отмечалось, на приборном щите стенда (см. рис. 22.1) установлен потенциометр ПТ с поворотным контактным рычагом, используемый в качестве регулятора постоянного тока в обмотке возбуждения тормоза.

Развернутая схема соединения электрических элементов потенциометрического регулятора изображена на рис. 22.5.

Кроме обычных, в его ветвях содержатся добавочные элементы. К ним относятся: обмотка *РБ* блокировочного реле, его два замыкающих контакта *Р'* и один размыкающий контакт *Р''*, а также полупроводниковый диод, шунтирующий обмотку реле.

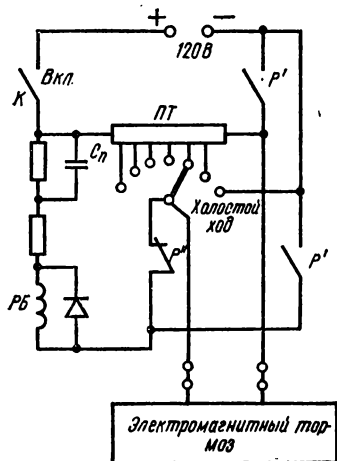


Рис. 22.5

Эти добавочные элементы исключают возможность включения потенциометрического регулятора лишь одной установкой тумблера *К* в позицию «Вкл.». Необходимо еще, чтобы контактный рычаг обязательно был повернут до отказа вправо, располагаясь в позиции «Холостой ход», когда ток в обмотке тормоза отсутствует. Тогда при включении тумблера *К* на обмотку *РБ* будет подано полное напряжение сети (120 В), реле сработает, замкнет оба контакта *Р'* и разомкнет контакт *Р''*.

В любой другой позиции (например, как на рис. 22.5), когда из-за отсутствия напряжения на обмотке *РБ* блокировочного реле его два контакта *Р'* находятся в замкнутом состоянии, резисторы потенциометра (даже при включенном тумблере *К*) не будут иметь электрического соединения с отрицательным полюсом автомата сети АС-2, а следовательно, потенциометр не будет действовать.

Следует иметь в виду, что если выводы потенциометра будут присоединены к полюсам автомата сети АС-2 с иной полярностью, то реле тоже не сработает, так как его обмотка будет закорочена (диод окажется в режиме прямого тока).

## П 22.3. Строботаксометр МЭИ

При измерении скорости вращения вала двигателя малой мощности необходимы такие устройства, которые не создавали бы дополнительной механической нагрузки на испытываемую машину в процессе измерения. Этому требованию полностью удовлетворяют стробоскопические устройства.

Один тип стробоскопических устройств установлен на стендах для выполнения лабораторных работ № 19, 20, 21 (см. приложения П 18, П 20.2), где применена безынерционная газоразрядная лампа (например, неоновая), соединяемая с генератором прямоугольных импульсов напряжения неизменной частоты.

Этот тип стробоскопических устройств пригоден для измерения скорости вращения только таких валов, частота вращения которых равна или незначительно отличается от частоты всплеск лампы.

Однако ротор исследуемого двухфазного асинхронного исполнительного двигателя может устойчиво вращаться с частотой, изменяющейся в очень широком диапазоне. Поэтому для измерения его скорости вращения в МЭИ были разработаны и изготовлены стробоскопические устройства, также использующие безынерционную газоразрядную лампу, но их подключают к генератору прямоугольных импульсов напряжения, следующих с регулируемыми частотами.

Генератор импульсов регулируемой частоты, выполняющий роль регулятора всплеск лампы, находится в измерительном блоке строботаксометра типа СТ-МЭИ, который выполнен в виде настольного прибора. На его лицевой панели (рис. 22.6) размещены: ручка 5 выключателя сети и осветителя, ручка 2 переключателя диапазонов измерения частоты вращения, сигнальная лампа 1, окно вибратора 6, ручки 3 верньера для плавного и грубого регулирования частоты всплеск газоразрядной лампы строботрона и шкала 4. Шкала прибора снабжена числовыми отметками, соответствующими частотам вращения вала, выраженным

числами его оборотов в минуту, и имеет три диапазона:  $300 \div 1200$ ;  $1200 \div 6000$  и  $6000 \div 30\,000$  об/мин.

На задней стенке шасси находится колодка для включения переносной газоразрядной лампы, колодка для включения прибора в осветительную сеть и сетевой предохранитель.

Включение прибора производят поворотом выключателя сети в положение «Сеть». Через 10 мин (после прогрева лампы) выключатель сети ставят в положение «Лампа».

Затем освещают окно вибратора светом импульсной лампы и, поворачивая ручки верньера регулирования частоты вспышек лампы, убеждаются в кажущейся неподвижности вибратора в трех контрольных точках шкалы: первый диапазон — 1000 об/мин (одно неподвижное изображение), второй диапазон — 3000 об/мин (одно неподвижное изображение), третий диапазон — 12 000 об/мин (два неподвижных изображения).

Далее на валу (или соединительной муфте) двигателя наносят метку и освещают ее светом импульсной лампы, диапазон вспышек которой выбирают по примерно известной из технических данных частоте вращения вала.

Принцип действия прибора заключается в том, чтобы для вращающегося с неизвестной частотой вала с меткой подобрать такую частоту вспышек лампы, при которой интервал между вспышками будет равен времени одного оборота вала. Тогда наблюдатель при каждой вспышке лампы на мгновение увидит метку в одном и том же положении. Так как люди способны сохранять зрительное восприятие в течение десятых долей секунды, то вращающаяся метка будет казаться неподвижной. Такую же картину, называемую стробоскопической, наблюдатель увидит и при частоте вспышек, в целое число раз меньшей частоты вращения вала. Если частота вспышек в целое число раз больше частоты вращения вала, то в интервале между двумя вспышками он успеет повернуться только на часть оборота, и наблюдатель увидит метку не в одном, а в нескольких различных положениях.

Существование кратных стробоскопических картин может привести к ошибочному представлению о действительной частоте вращения вала.

Правильному отсчету соответствует наибольшая частота вспышек, при которой наблюдается одно неподвижное изображение метки на валу.

Если частота сети отлична от 50 Гц на величину  $\Delta f$ , то при проверке прибора по вибратору необходимо учитывать изменение частоты его колебаний, рассчитав исправленные значения частот контрольных точек по формуле

$$k_1 = k (1 + \Delta f/50),$$

где  $k$  — основные значения частот контрольных точек трех диапазонов.

Так, например, при частоте сети 49,5 Гц новые контрольные величины частот будут иметь следующие значения: первый диапазон — 990 об/мин, второй диапазон — 2970 об/мин, третий диапазон — 11 880 об/мин. Точность измерения частоты вращения вала строботаксметра этого типа составляет один процент.

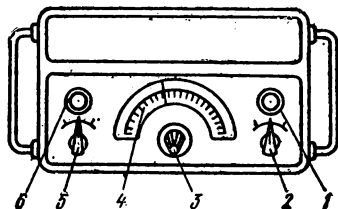


Рис. 22.6.

## П 22.4. Двухпозиционный безобрывный ваттметровый переключатель

Для обеспечения возможности измерения мощности одним однофазным ваттметром в двух цепях (фаз возбуждения и управления обмотки двигателя) на приборном щите стенда расположен безобрывный переключатель 2П, упрощенная mnemonic-схема которого показана на рис. 22.1, а развернутая — на рис. 22.7.



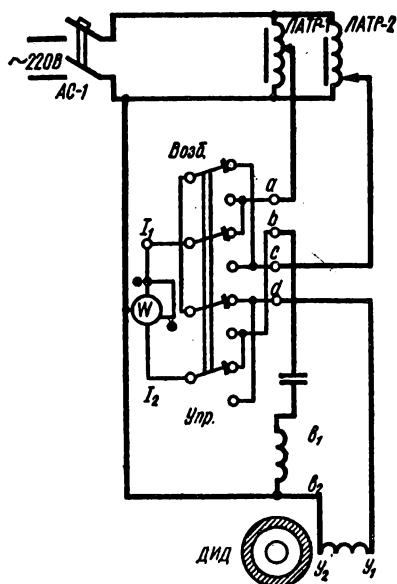


Рис. 22.7

между этими клеммами окажется включенной последовательная обмотка ваттметра, и он покажет мощность  $P_y$  фазы управления. Активную мощность двигателя находят суммированием показаний  $P_B$  и  $P_y$ .

Клеммы  $a$  и  $b$  включены последовательно с фазой возбуждения и конденсатором, а клеммы  $c$  и  $d$  — последовательно с фазой управления.

Схема соединения выводов последовательной и параллельной обмоток ваттметра с подвижными контактами  $I_1$  и  $I_2$  переключателя и с общим третьим проводом обмотки статора показана на рис. 22.7. Особое внимание необходимо обратить на соответствие мест соединения, обозначенных точками, — начала обмоток ваттметра (генераторные концы обмоток), с клеммами  $a$  и  $c$ , которые в свою очередь должны быть присоединены к гнездам подвижных контактов автотрансформаторов ЛАТР-1 и ЛАТР-2.

Из рассмотрения развернутой схемы безобрывного переключателя можно заключить, что при его расположении в позиции «Возб.» последовательная обмотка ваттметра будет включена в цепь фазы возбуждения, и он покажет мощность  $P_B$ . В этой позиции клеммы  $c$  и  $d$  будут замкнуты.

При перестановке переключателя в позицию «Упр.» ваттметр раньше подключится к еще замкнутым клеммам  $c$  и  $d$ , а затем без обрыва цепи управления

## Работа № 23

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМАХ КООРДИНАТОРА И ПОСТРОИТЕЛЯ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить возможности применения синусно-косинусного трансформатора (СКТ) для решения тригонометрических задач.

#### II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуется поворотный (вращающийся) трансформатор, укрепленный на переносной панели.

Трансформатор выполнен по типу двухфазной асинхронной машины с контактными кольцами, используемой в режиме поворота на не-

ограниченный угол. Машина рассчитана на включение в однофазную сеть при частоте 400 Гц. Номинальное напряжение на фазе первичной обмотки (на статоре) 60 В. Коэффициент трансформации  $k = 0,575$ .

Один конец вала СКТ соединен с червячным редуктором, обеспечивающим поворот и фиксацию ротора на желаемый угол. На другом конце вала расположен диск со шкалой для отсчета углов поворота.

На щитке переносной панели укреплены гнезда, соединенные с выводами  $C_1, C_2, C_3, C_4$  фаз статорной и с выводами  $P_1, P_2, P_3, P_4$  фаз роторной обмоток, и дана их mnemonic-схема. Кроме того, на переносной панели установлены два одинаковых резистора, имитирующие нагрузку вторичной обмотки трансформатора (сопротивление 500 Ом).

Внешний вид лицевой панели приборного щита стенда схематично изображен на рис. 23.1.

В правом верхнем углу щита находится автоматический выключатель АС-3, соединенный с сетью 115 В, 400 Гц.

Регулирование амплитуд переменных напряжений 400 Гц осуществляют одинаковыми проволочными потенциометрами 1ПТ и 2ПТ.

На стенде расположены три многопредельных вольтметра магнитоэлектрической системы с диодами, имеющие следующие пределы измерения напряжений:  $V_1$  — 75; 150; 300 В,  $V_2$  — 30; 75; 150 В и  $V_3$  — 15 В (при нажатой кнопке 1,5 В).

Вольтметр  $V_3$  служит в качестве индикатора отсутствия э. д. с. в фазе вторичной обмотки вращающегося (поворотного) трансформатора.

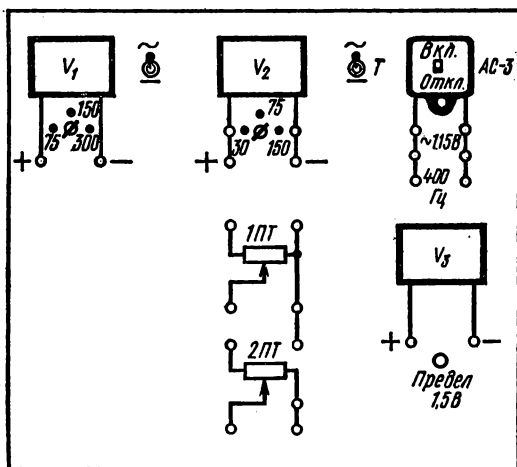


Рис. 23.1

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода СКТ, включив его в сеть в соответствии со схемой рис. 23.2.

Установить ротор в такое исходное положение, при котором э. д. с. в фазе  $P_1P_2$  обмотки ротора будет отсутствовать.

Выявить и построить графики зависимостей амплитуд напряжений на фазах обмотки ротора при номинальном напряжении на фазе  $C_1C_2$  обмотки статора от угла поворота ротора относительно его исходного положения.

3.2. Осуществить режим нагрузки вторичной обмотки СКТ, включив его в сеть в соответствии со схемой рис. 23.3.

Экспериментально решить задачу определения величин двух катетов в прямоугольных треугольниках, заданных гипотенузами и острыми углами. Величины гипотенуз принять численно равными действующему значению номинального напряжения на фазе обмотки статора, а углы —  $30^\circ$  и  $60^\circ$ .

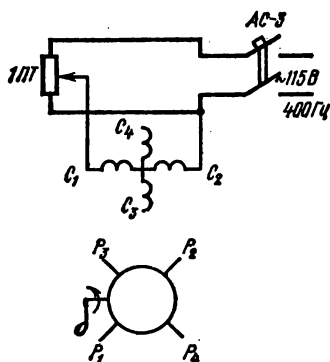


Рис. 23.2

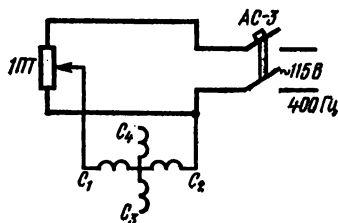


Рис. 23.3

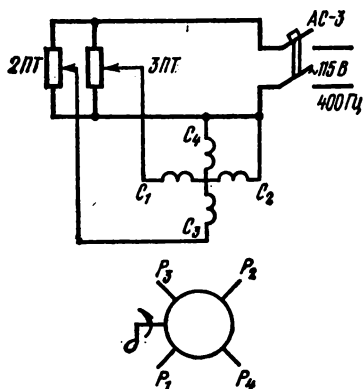


Рис. 23.4

По экспериментальным данным построить искомые треугольники напряжений и сравнить их с заданными.

3.3. Включить СКТ в сеть в соответствии со схемой рис. 23.4.

Решить задачу определения величин гипотенузы и острого угла в прямоугольном треугольнике, заданном двумя катетами. Величины катетов принять численно равными действующим значениям номинального напряжения на одной фазе и половине номинального напряжения на другой фазе обмотки статора.

Измерить величины напряжения на выходной фазе обмотки ротора

и угла поворота ротора в момент настройки СКТ на режим построителя, сравнив их с соответствующими величинами в треугольнике напряжений, построенном на заданных фазных напряжениях обмотки статора как на катетах.

#### **IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ**

4.1. Руководствуясь [1], рабочим заданием, техническими данными СКТ и приборов стенда, составить схемы включения вольтметров в цепи обмоток статора и ротора СКТ, необходимых для его испытания в режиме холостого хода по п. 3.1, а также для решения тригонометрических задач, предусмотренных п. 3.2 и 3.3 рабочего задания. Около приборов проставить желаемые диапазоны измерений напряжений.

4.2. Составить перечень операций, необходимых для выполнения п. 3.2 и 3.3 рабочего задания.

4.3. Заготовить таблицу для записи показаний приборов в схеме рис. 23.2, а также миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями и числовыми отметками величин для построения графика, предусмотренного п. 3.1 рабочего задания.

4.4. Составить таблицу цен делений всех вольтметров, используемых в работе.

#### **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. При исследовании СКТ в режиме холостого хода амплитуду напряжения на фазе возбуждения обмотки статора необходимо поддерживать постоянной и равной номинальной. Вначале устанавливают ось отсчета углов поворота ротора. Отсутствие э. д. с. проверяют по вольтметру  $V_3$ , который затем отключают.

5.2. При выявлении выходных зависимостей СКТ в режиме холостого хода угол поворота ротора желательно изменять через  $15^\circ$ .

5.3. При исследовании СКТ-координатора для имитации нагрузки в фазах обмотки ротора используют одинаковые резисторы с сопротивлением 500 Ом.

5.4. Перед решением задачи п. 3.3 задания производят настройку СКТ. Для этого на фазе  $C_1C_2$  устанавливают номинальное напряжение возбуждения, а фазу  $C_3C_4$  размыкают. Ротор СКТ поворачивают до исчезновения э. д. с. в квадратурной фазе  $P_1P_2$ . В этом положении в выходной фазе  $P_3P_4$  она достигает максимума. Полученное положение ротора принимают за исходное для дальнейшего отсчета углов. При вводе исходных данных на СКТ-построитель напряжения на фазах статора следует измерять поочередно одним вольтметром.

5.5. Величину напряжения на выходной фазе обмотки ротора СКТ-построителя в момент отсчета необходимо пересчитать с учетом известной величины коэффициента трансформации.

#### **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Почему одну из фаз обмотки ротора вращающегося трансформатора часто называют синусной, а другую — косинусной?

6.2. Для чего стремятся обе фазы обмотки ротора СКТ присоеди-

нить к двум приборам с одинаковыми внутренними сопротивлениями?

6.3. Почему амплитуда э. д. с. в фазе обмотки ротора СКТ зависит не только от амплитуды напряжения на фазе обмотки статора, но и от положения ротора?

6.4. Чем отличается работа СКТ в режиме координатора от работы в режиме построителя?

6.5. Какую величину называют коэффициентом трансформации СКТ?

6.6. Как вводят исходные данные на СКТ-координатор? Какие величины рассматривают в качестве ответа на задачу, решенную машиной?

6.7. Как вводят исходные данные на СКТ-построитель? Какие величины рассматривают в качестве ответа на задачу, решенную машиной?

6.8. Какие положения роторов СКТ-координатора и СКТ-построителя принимают за исходные для отсчета углов поворота? Как устанавливают эти положения?

## **Работа № 24**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЬСИНОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ И ИНДИКАТОРНОМ РЕЖИМАХ**

#### **I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить возможности применения сельсинов в качестве преобразовательных элементов измерительных и дистанционных следящих систем.

#### **II. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ**

Изучаемые сельсины смонтированы на двух переносных панелях: на одной — однофазные, контактные, с трехфазной обмоткой синхронизации на роторе, на другой — тоже однофазные, но бесконтактные, у которых как обмотка возбуждения, так и обмотка синхронизации расположены на статоре (см. приложение П 24.1).

На валу каждого сельсина насажен диск со шкалой, обеспечивающей возможность поворота ротора на требуемый угол, а для закрепления ротора в желательном положении на переносной панели установлены фиксаторы дисков.

Технические данные контактных сельсинов: тип СС-404; напряжение возбуждения 110 В;  $f = 50$  Гц; ток возбуждения 0,12 А; вторич-

ное напряжение 49 В; максимальный статический синхронизирующий момент 220 Г·см.

Технические данные бесконтактных сельсинов: тип БС-404А; напряжение возбуждения 110 В;  $f = 50$  Гц; ток возбуждения 0,45 А; вторичное напряжение 49 В; максимальный статический синхронизирующий момент 240 Г·см.

Для создания и измерения момента, уравнивающего синхронизирующий момент бесконтактного сельсина-датчика, на валу последнего укрепляют груз на штанге.

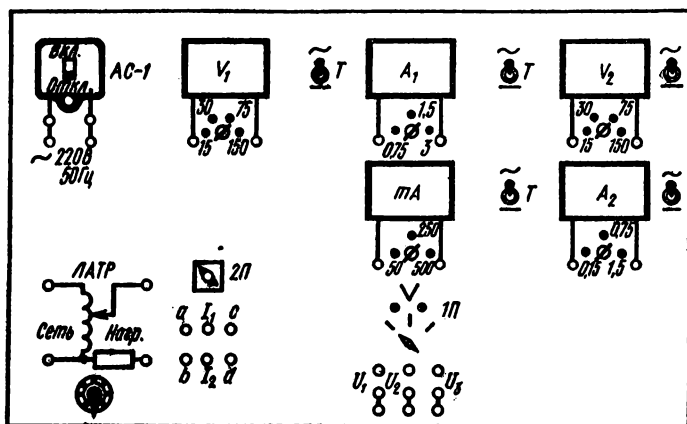


Рис. 24.1

На щитке каждой переносной панели укреплены гнезда, соединенные с выводами обмоток возбуждения и синхронизации.

Вольтметры и амперметры с переключателями, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) для регулирования напряжения на обмотках возбуждения сельсинов, а также автоматический выключатель АС-1, присоединенный к однофазной цепи 220В, 50 Гц, размещены на приборном щите стенда. Внешний вид лицевой панели приборного щита стенда схематично показан на рис. 24.1.

Пределы измерения вольтметров: 15; 30; 75; 150 В. Пределы измерения амперметров:  $A_1$  — 0,75; 1,5; 3 А;  $A_2$  — 0,15; 0,75; 1,5 А. Миллиамперметр измеряет токи в диапазоне 50, 250 и 500 мА.

Для измерения одним вольтметром напряжений между тремя парами полюсов (выводов) обмоток синхронизации сельсинов на стенде установлен трехпозиционный переключатель 1П (см. схему рис. 22.3).

Для измерения одним амперметром токов в двух проводах линий связи сельсинов можно воспользоваться безобрывным двухпозицион-

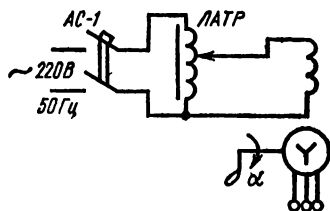


Рис. 24.2

ным переключателем 2П. Действие и схема внутреннего соединения элементов этого переключателя даны в руководстве к лабораторной работе № 22 (см. приложение П 22.4). Необходимо только представить себе, что вместо символа ваттметра на схеме рис. 22.7 изображен символ амперметра.

### III. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

3.1. Осуществить режим холостого хода сельсина, включив его в сеть в соответствии со схемой рис. 24.2.

Выявить и построить график зависимостей амплитуд линейных напряжений на обмотке синхронизации от угла поворота ротора.

3.2. Руководствуясь схемой рис. 24.3, исследовать и построить графики зависимостей токов в проводах линий связи и синхронизирующего момента от угла рассогласования двух контактных сельсинов, работающих в индикаторном режиме.

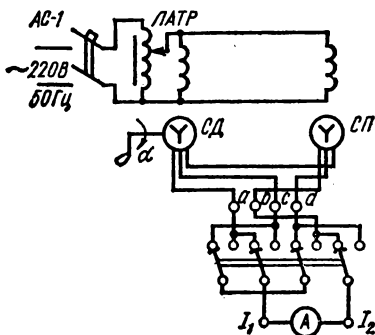


Рис. 24.3

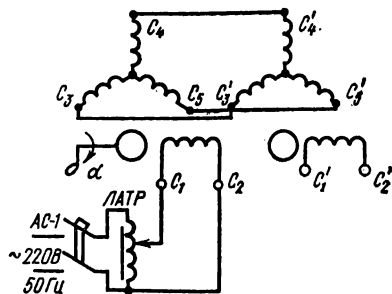


Рис. 24.4

3.3. Включить пару бесконтактных сельсинов в сеть согласно схеме рис. 24.4 для работы в трансформаторном режиме.

Установить и построить графики зависимостей амплитуд выходного напряжения системы сельсинов и действующих значений токов в проводах линии связи от угла поворота ротора сельсина-датчика при неподвижном роторе сельсина-приемника.

### IV. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

4.1. Ознакомиться с устройством и принципом действия бесконтактных сельсинов (см. приложение П 24.1).

4.2. Дополнить схемы рис. 24.2, 24.3 и 24.4 условными обозначениями вольтметров, переключателя 1П, амперметров и переключателя 2П, указав места их включения в цепи обмоток сельсинов. Около символов приборов проставить конечные значения измеряемых ими величин.

4.3. Составить таблицу цен делений всех используемых вольтметров и амперметров.

4.4. Составить перечень и требуемую последовательность выполнения всех операций, предусмотренных каждым этапом рабочего задания.

4.5. На рис. 24.5 схематично представлено равновесное состояние штанги с грузом, повернутой внешними силами на угол  $\alpha_n$  относительно вертикали.

Составить формулу для расчета величины момента этих сил, если известно, что на груз действует сила веса  $P$ , а расстояние от точки ее приложения до оси вала равно  $L$ .

4.6. Заготовить таблицы для записи показаний приборов и углов поворота роторов сельсинов, предусмотренных каждым этапом рабочего задания.

4.7. Заготовить миллиметровую бумагу размером  $100 \times 100$  мм с координатными осями и числовыми отметками величин для построения всех графиков, предусмотренных рабочим заданием.

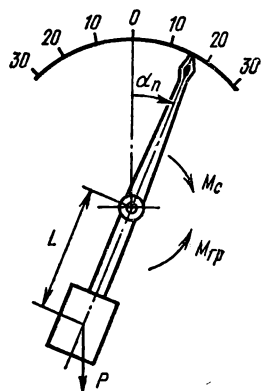


Рис. 24.5

## **V. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

5.1. Зависимость вторичных напряжений от угла поворота ротора достаточно выявить только для одного контактного сельсина-датчика. За исходное положение оси ротора принять такое, при котором одно из линейных напряжений отсутствует. Углы поворота ротора сельсина-датчика удобно задавать посредством нажатия на фиксатор и последующего поворота диска со шкалой на нужное число градусов. Угол поворота ротора в пределах от 0 до  $180^\circ$  рекомендуется изменять через  $10^\circ$ .

Линейные напряжения на обмотке синхронизации измеряют последовательным подключением вольтметра к зажимам фаз обмотки синхронизации с помощью переключателя 1П (см. рис. 24.1 и 22.3) при одном и том же положении ротора.

5.2. При исследовании сельсинов в индикаторном режиме диск ротора сельсина-датчика следует установить в такое положение, при котором стрелка сельсина-приемника указывает на нуль. Это положение диска принимается за нуль отсчета углов поворота ротора.

5.3. При выполнении всех этапов рабочего задания напряжение возбуждения сельсинов устанавливают и поддерживают (при помощи ЛАТРа) равным номинальному.

5.4. При исследовании сельсинов в индикаторном режиме угол поворота сельсина-датчика изменяют в пределах от 0 до  $200^\circ$ . При углах поворота от  $60^\circ$  до  $200^\circ$  испытания следует проводить быстро во избежание недопустимого перегрева обмоток сельсина. Угол рассогласования



в этом режиме следует определять как разность углов поворота сельсина-датчика и сельсина-приемника.

5.5. При исследовании сельсинов в трансформаторном режиме необходимо установить начало отсчета углов рассогласования, для чего ротор сельсина-датчика закрепляют в исходном положении. Ротор сельсина-приемника фиксируют в таком положении, при котором выходное напряжение отсутствует или минимально. Отсчет углов рассогласования ведут при повороте ротора сельсина-приемника от 0 до  $180^\circ$  через  $10^\circ$ .

## **VI. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

6.1. Объясните принцип действия и устройство контактного сельсина.

6.2. Объясните принцип действия и устройство бесконтактного сельсина.

6.3. Нарисуйте схему включения сельсинов в индикаторном режиме.

6.4. Нарисуйте схему включения сельсинов в трансформаторном режиме.

6.5. Когда применяют индикаторный и трансформаторный режимы?

6.6. Нарисуйте примерный вид графика зависимости напряжений на обмотке синхронизации от времени для одного положения ротора.

6.7. В чем различие между системой токов и э. д. с. трехфазной обмотки синхронизации сельсина и трехфазными системами токов и напряжений промышленных сетей?

6.8. В чем преимущества и недостатки систем синхронной связи в трансформаторном и индикаторном режимах?

6.9. Как влияет амплитуда напряжения возбуждения на величину синхронизирующего момента сельсина?

6.10. В каком случае амплитуда выходного напряжения сельсина-приемника изменяется в зависимости от угла рассогласования по синусному, а в каком — по косинусному законам?

## **VII. ПРИЛОЖЕНИЯ**

### **П 24.1. Устройство бесконтактных сельсинов**

Щеточно-контактный узел является самым ненадежным конструктивным узлом контактных сельсинов: слабое нажатие щетки на кольцо может нарушить контакт между ними, а сильное — увеличить момент трения на валу и снизить точность синхронной передачи угловых перемещений. Эти недостатки устранены в бесконтактном сельсине, устройство которого поясняет рис. 24.6.

Обмотки возбуждения 1 и синхронизации 2 в бесконтактном сельсине неподвижны. Трехфазная обмотка синхронизации расположена в пазах статора. Обмотка возбуждения состоит из двух кольцевых катушек, оси которых совпадают с осью ротора. При таком расположении обмоток возбуждения и синхронизации они не оказывают влияния друг на друга.

Для сцепления потока возбуждения с обмоткой синхронизации применен ротор 3 специальной формы, цилиндрический сердечник которого разделен на-

искошь немагнитной прокладкой 4. Вследствие такой конструкции ротора поток возбуждения изменяет свое направление в пространстве и через небольшой зазор от ротора проходит в пакет статора 5, а далее по ярму статора — до диаметрально противоположной точки, затем снова через зазор входит во вторую часть ротора, являющуюся как бы вторым полюсом. Далее поток опять через два зазора, кольца 6 и магнитопровод 7 (не имеющий магнитной связи с пакетом статора) попадает в первую часть ротора.

При повороте ротора положение оси потока возбуждения относительно обмотки синхронизации изменяется так же, как в контактных сельсинах.

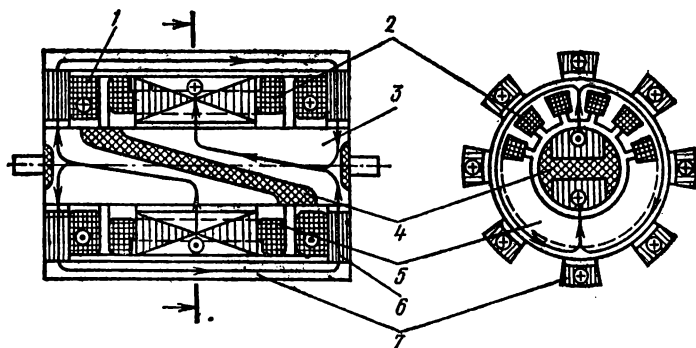


Рис. 24.6

Между работой контактных и бесконтактных сельсинов в схемах синхронной связи принципиальных различий нет.

В бесконтактном сельсине поток возбуждения проходит четыре воздушных зазора вместо двух в обычных машинах. Поэтому намагничивающий ток здесь больше, а cosφ меньше, чем у контактного сельсина. Но отсутствие скользящих контактов значительно увеличивает надежность работы и стабильность характеристик бесконтактного сельсина.

## Литература

1. Электротехника. Под ред. В. С. Пантюшина. Изд. 2-е. «Высшая школа», 1976.
2. Сборник задач по общей электротехнике. Под ред. В. С. Пантюшина. Изд. 2-е. «Высшая школа», 1973.

# Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
I. Общие рекомендации по осуществлению лабораторного эксперимента	5
II. Рекомендации по электрическим измерениям в лабораторном практикуме	10
III. Техника безопасности при работе с электрическими установками	24
Работа № 1. Применение компенсационного измерительного устройства постоянного напряжения для определения температуры макета нагревательной установки	26
Работа № 2. Применение компенсационного измерительного устройства постоянного тока для определения освещенности лабораторного стенда	33
Работа № 3. Градуировочная характеристика измерительного устройства, содержащего резисторный мост постоянного тока с нелинейным первичным преобразователем и амперметр	39
Работа № 4. Использование электрической модели постоянного тока для исследования режимов работы теплообменника.	42
Работа № 5. Исследование влияния параметров неразветвленной цепи на амплитудно-фазовые соотношения между напряжениями ее участков	46
Работа № 6. Исследование влияния параметров цепи на амплитудно-фазовые соотношения между токами в ее параллельно соединенных ветвях	51
Работа № 7. Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными звездой	56
Работа № 8. Исследование электрического состояния трехфазной цепи с однофазными приемниками, соединенными треугольником	59
Работа № 9. Амплитудно-частотные характеристики электрических фильтров	62
Работа № 10. Исследование переходных процессов в цепях с резисторами и конденсаторами	66
Работа № 11. Исследование влияния магнитопровода дросселя на величину и форму тока в обмотке	74
Работа № 12. Исследование влияния рода нагрузки на электрическое состояние однофазного трансформатора малой мощности	77
Работа № 13. Исследование трехфазного трансформатора в режимах холостого хода и короткого замыкания	80
Работа № 14. Исследование рабочих свойств дроссельного магнитного усилителя	83
Работа № 15. Внешние характеристики генератора постоянного тока.	88
Работа № 16. Механические естественные и рабочие характеристики двигателя постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения	93
Работа № 17. Механические искусственные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения	102
Работа № 18. Изучение влияния величин фазных напряжений обмотки статора на рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	107
Работа № 19. Механическая естественная и рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с контактными кольцами	114
Работа № 20. Угловая и U-образные характеристики трехфазного синхронного генератора	120
Работа № 21. Рабочие характеристики трехфазного синхронного двигателя	128
Работа № 22. Механические и рабочие характеристики двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с амплитудно-фазовым управлением	132
Работа № 23. Исследование поворотного трансформатора в режимах координатора и построителя	142
Работа № 24. Исследование сельсинов в трансформаторном и индикаторном режимах	146
Литература	151

28 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКВА  
1977 ГОД  
ВЫСШАЯ ШКОЛА

