

А. А. ИВАНОВ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ГОСТЕХИЗДАТ УССР
Киев — 1958

А. А. ИВАНОВ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ
ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ

*Допущено
Министерством высшего образования УССР
в качестве учебного пособия
для технологических вузов УССР*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

КИЕВ — 1958

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов технологических вузов УССР, в которых читается курс общей электротехники и электрооборудования промышленных предприятий.

Цель книги помочь студентам подготовиться к выполнению лабораторных работ по данной учебной дисциплине и в обработке результатов опыта, а также способствовать приобретению практических навыков к самостоятельному испытанию электроэнергетических установок промышленных предприятий.

Анатолий Александрович Иванов

**Лабораторные работы по общей электротехнике и электрооборудованию
промышленных предприятий**

Редактор *О. Бондаренко*

Технический редактор *С. Матусевич*

Корректоры *Л. Бобовникова* и *Н. Радецкая*

Сдано в набор 31/1 1957 г. Подписано к печати 11/1 1958 г. Формат бумаги 60×92¹/₁₆.

Объем: 25¹/₂ физ. лист.; 25¹/₂ условн. лист.; 26,1 учетно-издат. лист. Тираж 9500.

БФ 00004.

Цена 8 руб. 85 коп.

Государственное издательство технической литературы УССР,

г. Киев, ул. Красноармейская, 11.

Зак № 64. Напечатано с матриц Львовской кн. тип. в Кн. типографии № 3
Главиздата Министерства культуры УССР. Киев, Золотоворотская, 11.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторные работы, описанные в данном учебном пособии, являются составной частью курса по общей электротехнике и специальному электрооборудованию и предназначаются для студентов высших учебных заведений ~~и~~ электротехнических специальностей.

Настоящая работа ставит своей целью облегчить студентам самостоятельную подготовку к предстоящему выполнению работ в лабораториях, обучить их методике измерений различных электротехнических величин и правильному обращению с электрическими цепями, а также углубить их знания в области электротехники и специального электрооборудования.

Данное учебное пособие ставит своей задачей ознакомить студентов с наиболее распространенным электрооборудованием и отдельными достижениями современной техники по промышленному использованию электрической энергии, обучает принятой методике и технике испытания трансформаторов, электрических машин, преобразователей, наиболее употребительных реле, магнитных пускателей, исследованию некоторых электроприводов, знакомит с элементами электроавтоматики и сигнализации, освещает работу по эксплуатации основного оборудования на трансформаторных подстанциях, а также разбирает методы повышения коэффициента мощности электрооборудования на промышленных предприятиях и способы измерения освещенности рабочих мест.

Тематика лабораторных работ соответствует программам высших учебных заведений и подобрана так, чтобы всесторонне осветить основные разделы теоретического курса и помочь освоить принцип работы электрооборудования, выпускаемого отечественными заводами, которым располагают электротехнические лаборатории институтов.

В данном руководстве — 50 лабораторных работ.

Из них, для выполнения студентами, назначаются наиболее характерные в соответствии с профилем подготавливаемого специалиста.

В приложении 5 приведен примерный распорядок выполнения лабораторных работ для студентов механического, технологиче-

ского и инженерно-экономического факультетов технологических институтов.

При отсутствии в лабораториях части оборудования, потребного для постановки указанных работ, некоторые работы могут быть заменены другими, описанными в данном пособии.

Для студентов тех факультетов, где изучаемая дисциплина преподается в сокращенном объеме, преподаватель может изменить объем каждой из описанных в руководстве работ, исключая часть пунктов ее содержания.

Часть лабораторных работ может быть поставлена как факультативная и использована при работе со студентами-отличниками, а также для проведения занятий в научно-студенческом кружке.

Таким образом, данное пособие можно рассматривать как сборник лабораторных работ, которые могут быть использованы для различных специальностей высших учебных заведений, где действуют программы разного объема.

Автор полагает, что предлагаемое руководство поможет студентам оформлять экспериментально полученные данные, научит их давать критическую оценку результатам опыта и будет способствовать более глубокой проработке теоретического курса электротехники и вопросов, связанных с электроснабжением и электрооборудованием промышленных предприятий.

Замечания и пожелания по этой книге просим направлять по адресу: Киев, Красноармейская, 11, Гостехиздат УССР.

ВВЕДЕНИЕ

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Электротехнические лаборатории высших учебных заведений являются практической школой студентов, где они впервые знакомятся с электрическими цепями и аппаратурой, учатся постановке эксперимента, наблюдению и регистрации различных электрических процессов, переходя в дальнейшем к рассмотрению конструкций электрических машин, электронной и ионной аппаратуры, методам их испытаний и завершают свое обучение изучением силового электрооборудования, применяемого на различных промышленных объектах и в сельском хозяйстве.

Перед началом занятий в электротехнической лаборатории преподаватель должен провести вступительную беседу со студентами, объяснить им значение работы в лаборатории, познакомить с применяемой в ней аппаратурой и дать ряд методических указаний к выполнению лабораторных работ.

Здесь же преподаватель должен ознакомить студентов со специфическими условиями работы в данной лаборатории, правилами внутреннего распорядка, организацией рабочего времени, уделив особое внимание вопросам *техники безопасности* при работе с электрическими цепями, машинами и аппаратами.

Студенты, впервые приступающие к работе в электротехнических лабораториях, после вступительной беседы, проводимой преподавателем, обязаны основательно изучить правила для работающих в них (см. приложение 4).

В заключение необходимо ознакомить студентов с планом проведения лабораторных работ на текущий семестр и рекомендовать им необходимую для изучения литературу.

Для получения наибольшего эффекта от лабораторных занятий каждую лабораторную работу целесообразно проводить бригадой в составе двух-трех человек.

При выполнении лабораторных работ по основам электротехники желательно в бригаде иметь по два студента, при испытаниях электрических машин, а также по работам по электрообору-

дованию, когда одновременно приходится записывать отсчеты по многим приборам, работу проводит бригада из трех-четырех человек.

Каждая бригада должна выполнить на протяжении семестра все лабораторные работы по своему индивидуальному плану, составленному на текущий семестр кафедрой (см. приложение 5).

Студенты, согласно имеющемуся у них плану проведения лабораторных занятий, должны заблаговременно готовиться к предстоящему занятию в лаборатории.

Подготовка эта состоит в изучении соответствующих разделов теоретического курса по лекционным записям и учебной литературе, указанной в каждой инструкции, подробного изучения описания работы и схемы экспериментальной установки по данному руководству, а также аккуратной подготовке таблиц наблюдений, в которые во время экспериментирования студент должен записывать все данные, полученные при проведении опыта.

Схема установки и таблицы наблюдений заносятся заблаговременно в специальный бланк для выполнения лабораторной работы (см. приложение 3).

Студенты, явившиеся на занятия, опрашиваются преподавателем по материалу работ для выяснения степени подготовленности студентов к проведению лабораторных работ и разъяснения отдельных неясных для них мест.

Студенты, явившиеся на занятия неподготовленными, к занятиям не допускаются.

Вся экспериментальная часть работ выполняется студентами в полном соответствии с инструкциями непосредственно под руководством преподавателя с *соблюдением правил по технике безопасности.*

Для отдельных специальностей преподаватель может сократить объем лабораторной работы, исключая отдельные ее пункты.

При сборке схем студенты должны сначала собрать последовательную цепь из проводов относительно большого сечения, а затем при помощи более тонких проводов присоединить вольтметры, параллельные обмотки ваттметров и счетчиков, обратив особое внимание на плотность контактов.

Перед началом работы стрелки электроизмерительных приборов должны быть установлены на нуль, а приборы с несколькими пределами измерений, кроме того, должны быть включены на максимальные пределы измерений.

Показания приборов необходимо записывать в делениях шкалы приборов с указанием цены деления.

Произведенные отсчеты и результаты измерений заносятся студентами в заранее заготовленные таблицы наблюдений и представляются для просмотра руководителю занятий *до разборки схемы.* Если результаты наблюдений будут признаны неудовлетворительными, то опыт необходимо повторить.

Полученные данные наблюдений в дальнейшем частично обрабатываются студентами в лаборатории, а окончательно — дома, затем составляется отчет о выполненной работе по соответствующей форме (см. приложение 3).

Отчет должен быть составлен студентом настолько ясно, чтобы всякий, знакомящийся с ним, ясно представлял себе цель постановки данной работы, тип экспериментальной установки, методику измерения отдельных величин, порядок проведения работы, расчет отдельных электрических величин, окончательные результаты испытаний, сгруппированные в таблицы и отображенные графиками, а также познакомился с выводами, сделанными на основе полученных экспериментальных данных.

При составлении отчета студенты должны применять в формулах и схемах условные технические обозначения, рекомендуемые ГОСТ (см. приложения 1, 2).

При построении экспериментальных кривых студенты должны на координатных осях, отмеченных буквами, условно обозначающими откладываемые величины, с указанием их размерностей, нанести деления, проставить около них числовые значения откладываемых величин в выбранном масштабе (в $1\text{ см} — 1 \cdot 10^n$, $2 \cdot 10^n$, $5 \cdot 10^n$ единиц, где n — любое целое число), нанести экспериментально полученные точки и провести *плавную* линию, которая проходила бы возможно ближе к точкам, полученным из опыта.

Иногда удобно графические зависимости представлять в «относительных единицах», например, при испытании электрических машин, когда за единицу измерения принимают номинальные: напряжение U_n , ток I_n , мощность P_n , скорость вращения n_n и т. д. Тогда любая величина определяется в долях от соответствующего номинального значения этой же величины.

Такие графики, построенные в относительных единицах, очень удобны: для сравнения свойств электрических машин и аппаратов, различных по своим номинальным мощностям.

Отчет представляется каждым студентом преподавателю к следующему лабораторному занятию, без чего он не допускается к выполнению очередного задания.

При сдаче отчета преподаватель опрашивает студента в объеме материала законченной работы, после чего работа засчитывается.

Студенты, выполнившие все предусмотренные графиком лабораторные работы (см. приложение 5) и сдавшие *своевременно* отчеты по ним, получают зачет по соответствующей части курса общей электротехники и электрооборудования промышленных предприятий.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Для проведения различных измерений в электрических цепях применяется специальная электроизмерительная аппаратура.

Важнейшей характеристикой любого электроизмерительного прибора является его точность.

В зависимости от точности электроизмерительные приборы делятся на семь классов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

Число, характеризующее класс точности прибора, представляет собой отношение допускаемой основной абсолютной погрешности прибора в рабочей части шкалы к верхнему пределу измерений прибора, выраженное в процентах.

Под рабочей частью шкалы для приборов с равномерной шкалой понимается вся шкала, а для приборов с неравномерной шкалой — часть ее в пределах 25—100% от верхнего предела шкалы.

Любой электроизмерительный прибор должен соответствовать роду тока, должен быть выбран на необходимые пределы измерений, находиться в определенном положении по отношению к горизонтальной поверхности и установлен в месте, где отсутствуют внешние причины, искажающие результат измерения.

Приборы, служащие для измерения тока, включаются в цепь последовательно, а приборы, измеряющие напряжение, — параллельно.

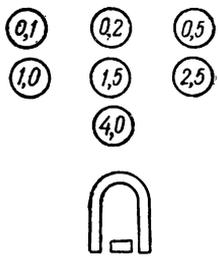
В соответствии с ГОСТ 1845—52 на шкале прибора указываются: марка прибора, заводской номер, обозначение единицы измерения измеряемой величины, номер ГОСТ, класс точности, условное обозначение рода тока, условное обозначение системы прибора, условное обозначение испытательного напряжения, год выпуска и ряд других величин.

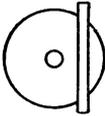
В электротехнических лабораториях наибольшее применение находят приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, индукционной, а иногда тепловой и электростатической системы.

Для обозначения перечисленных величин используются специальные условные обозначения, приведенные в табл. 1, которые наносятся на шкалы приборов.

Таблица 1

Условные знаки на шкалах электроизмерительных приборов

<i>Условное обозначение</i>	<i>Наименование</i>
 <p>Условные обозначения классов точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 и магнитоэлектрической системы.</p>	<p>Класс точности 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0</p> <p>Магнитоэлектрическая система</p>

Условное обозначение	Наименование
	Детекторная система
	Электромагнитная система
	Электродинамическая система
	Ферродинамическая система
	Индукционная система
	Тепловая система
	Электростатическая система
	Вертикальная установка прибора
	Наклонная установка прибора под углом 60°
	Горизонтальная установка прибора
	Изоляция прибора испытана напряжением 2000 в

Примечание. Если знак системы обведен окружностью, то это указывает на наличие магнитного экрана в приборе.

Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы (табл. 1), основанные на взаимодействии измеряемого тока с полем постоянного магнита, применяют для измерения токов и напряжений только в цепях постоянного тока; они имеют равномерную шкалу, отличаются высокой точностью и чувствительностью, а также небольшим потреблением мощности. Приборы для измерения тока включают последовательно, а для измерения напряжений — параллельно.

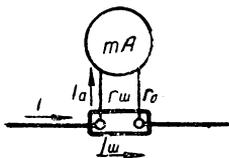


Рис. 1. Схема включения электроизмерительного прибора с шунтом для измерения величины тока, протекающего в проводнике.

Недостатком данных приборов является низкая перегрузочная способность и непригодность для непосредственных измерений в цепях переменного тока.

При включении приборов магнитоэлектрической системы необходимо, чтобы в зажим со знаком $+$ ток входил, а из зажима со знаком $-$ выходил, иначе стрелка будет отклоняться в направлении, противоположном обычному.

Для расширения пределов измерения магнитоэлектрических приборов применяют шунты и добавочные сопротивления.

Шунты представляют собой калиброванные сопротивления $r_{ш}$, включаемые последовательно в цепь, в которой необходимо измерить протекающий ток I , а измерительный прибор присоединяют к шунту параллельно (рис. 1).

Величину тока, протекающего в цепи, определяют по формуле

$$I = I_a \left(1 + \frac{r_a}{r_{ш}} \right), \quad (1)$$

где I_a — ток, измеряемый электроизмерительным прибором; r_a и $r_{ш}$ — соответственно сопротивление прибора и шунта.

Часто используют комбинированные шунты, позволяющие использовать один и тот же прибор на несколько пределов измерения.

На рис. 2 показана схема включения комбинированного шунта на три предела измерения (1,5, 3 и 15 а) для измерения токов до 3 а.

Шунты могут быть наружные и встроенные в корпус прибора.

При встроенных комбинированных шунтах прибор имеет специальную рукоятку для переключения пределов измерений либо несколько различных зажимов, как у наружных шунтов.

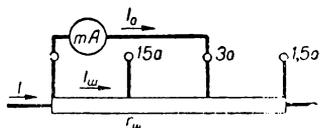


Рис. 2. Схема включения электроизмерительного прибора с комбинированным шунтом для измерения токов до 3 а.

Для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные сопротивления r_d , которые включаются последовательно с электроизмерительным прибором (рис. 3).

Измеряемое напряжение

$$U = U_v \left(1 + \frac{r_d}{r_v} \right), \quad (2)$$

где U_v — напряжение, указываемое вольтметром;

r_v — сопротивление обмотки вольтметра;

r_d — добавочное сопротивление.

В отдельных случаях один и тот же прибор применяют на несколько пределов измерения, используя комбинированное добавочное сопротивление.

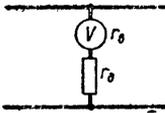


Рис. 3. Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением.

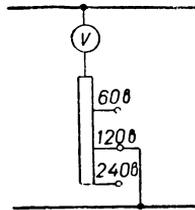


Рис. 4. Схема включения вольтметра с комбинированным добавочным сопротивлением для измерения напряжений до 120 в.

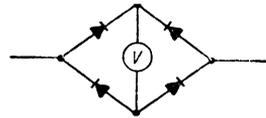


Рис. 5. Принципиальная схема электроизмерительного прибора детекторной системы.

На рис. 4 показано включение такого комбинированного добавочного сопротивления на три предела измерения (60, 120 и 240 в) для измерения напряжений до 120 в.

Магнитоэлектрические приборы могут быть и со встроенными меднозакисными выпрямителями, включенными по двухполупериодной схеме (рис. 5).

Такие приборы относятся к детекторной системе (табл. 1) и используются в цепях не только постоянного, но и переменного тока.

Приборы электромагнитной системы

Приборы электромагнитной системы (табл. 1), основанные на взаимодействии между измеряемым током и ферромагнитным телом, применяются преимущественно для измерения токов и напряжений и имеют неравномерную шкалу.

Эти приборы пригодны для цепей постоянного и переменного токов, отличаются простотой конструкции и высокой перегрузочной способностью.

Недостатком их является зависимость показаний от частоты переменного тока и наличия внешних магнитных полей. Для устранения последнего недостатка и получения большей точности измерения промышленностью выпускаются астатические электромагнитные приборы.

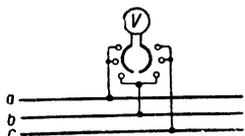


Рис. 6. Схема включения вольметра с вольметровым переключателем.

В цепях трехфазного тока часто измеряют напряжения одним электромагнитным вольтметром с вольтовым переключателем (рис. 6).

Вольтовый переключатель состоит из двух металлических изолированных друг от друга полуколец, которые при помощи перемычек, укрепленных на общем рычаге, изготовленном из изоляционного материала, могут быть соединены с любой парой диаметрально расположенных контактов.

К полукольцам присоединяется вольметр, а к контактам три провода, идущие от линейных проводов трёхфазной системы.

Расширение пределов измерений электромагнитного амперметра на переменном токе осуществляется измерительным трансформатором тока (рис. 7), а в лабораторных приборах — путем секционирования их обмоток.

При включении трансформатора тока необходимо обращать внимание на расположение первичной и вторичной обмоток.

Первичная обмотка имеет зажимы $L1$ — $L2$, а вторичная — $I1$ — $I2$.

Когда по первичной обмотке протекает измеряемый ток, вторичная не должна быть разомкнутой во избежание возникновения в ней значительного напряжения, опасного для экспериментаторов и целости изоляции самой обмотки.

Измерительные трансформаторы тока бывают с одним коэффициентом трансформации, например, 10/5, 20/5, а также универсальные, допускающие изменение коэффициента трансформации.

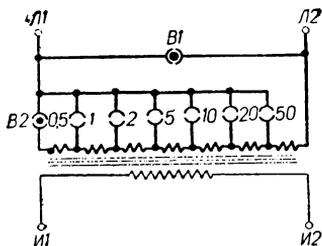


Рис. 8. Схема универсального лабораторного трансформатора тока типа ЛТТ-1.

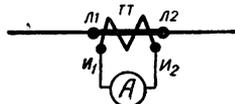


Рис. 7. Схема включения амперметра через измерительный трансформатор тока.

К числу последних относится измерительный трансформатор тока типа ЛТТ-1 (рис. 8), который имеет семь пределов измерений: 0,5—1—2—5—10—20—50а при вторичном токе 5а.

Трансформатор имеет две вилки $B1$ и $B2$, которые включаются в штепсельные гнезда. Вилка $B1$ служит для закорачивания первичной обмотки, а $B2$ — для изменения коэффициента трансформации.

Изменять коэффициент трансформации при включенном трансформаторе можно только при закороченной первичной обмотке.

При включении амперметра через измерительный трансформатор тока измеряемый ток определяют по формуле

$$I = k_T I_a, \quad (3)$$

где I_a — показание амперметра;

k_T — коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока.

Для расширения пределов измерения электромагнитного вольтметра на переменном токе изменяют как измерительные трансформаторы напряжения (рис. 9), так и добавочные сопротивления.

При использовании трансформаторов напряжения измеряемое напряжение находят из соотношения

$$U = k_n U_v, \quad (4)$$

где U_v — показание вольтметра;

k_n — коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения.

К числу приборов электромагнитной системы относятся частотомеры, фазометры и др.

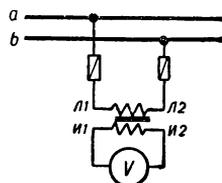


Рис. 9. Схема включения вольтметра через измерительный трансформатор напряжения.

Приборы электродинамической системы

Приборы электродинамической системы (табл. 1) основаны на принципе взаимодействия двух токов, протекающих по разным катушкам, из которых одна неподвижная, а другая может изменять свое положение относительно первой.

Эта система используется при конструировании электроизмерительных приборов, предназначенных для измерения тока, напряжения, мощности и других электрических величин.

У электродинамических амперметров и вольтметров шкалы неравномерные, а у ваттметров — практически равномерные.

Приборы электродинамической системы являются наиболее точными для измерений в цепях переменного тока, однако они не могут выносить перегрузку и на их показания сильно влияют внешние магнитные поля.

В лабораторных приборах высокого класса точности для уменьшения влияния внешних магнитных полей применяют экранирование и астатическое построение измеряемой системы.

Астатические приборы имеют два совершенно одинаковых измерительных элемента, расположенных таким образом, что маг-

нитные поля соответствующих катушек имеют противоположные направления.

Такая конструкция практически исключает влияние внешнего магнитного поля на показания приборов.

В электродинамических приборах шкала часто бывает разделена на α_m делений без указания значения этих делений в измеряемых единицах (v, a, vt).

В этом случае постоянную прибора, т. е. число измеряемых единиц (v или a), соответствующих одному делению шкалы, определяем по формулам:

для вольтметра

$$C_v = \frac{U_n}{\alpha_m} \quad (5)$$

и для амперметра

$$C_a = \frac{I_n}{\alpha_m}, \quad (6)$$

где U_n, I_n — соответственно номинальные значения напряжения и тока приборов;

α_m — полное число делений шкалы прибора.

Расширение пределов измерений электродинамических амперметров осуществляется секционированием их неподвижной катушки (амперметры 0,5/1 a , 2,5/5 a , 5/10 a), а также измерительными трансформаторами тока.

Расширение шкал электродинамических вольтметров осуществляется использованием добавочных сопротивлений, а также измерительных трансформаторов напряжения.

Наибольшее распространение среди электродинамических приборов нашел ваттметр, схема включения которого представлена на рис. 10.

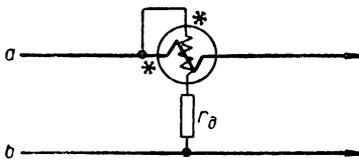


Рис. 10. Схема включения ваттметра однофазного тока.

Неподвижная катушка с небольшим числом витков толстой проволоки включается в цепь последовательно, а подвижная, соединенная с наружным или встроенным добавочным сопротивлением r_d , — параллельно к тому

участку цепи, в котором измеряется потребляемая мощность.

Постоянная ваттметра находится из соотношения

$$C = \frac{U_n I_n}{\alpha_m}, \quad (7)$$

а величина измеряемой мощности

$$P = C\alpha, \quad (8)$$

где U_n, I_n — номинальные величины, на которые рассчитан ваттметр;

α_m — полное число делений шкалы ваттметра;

α — число делений, отсчитанных по шкале прибора.

Расширение шкалы электродинамического ваттметра по току осуществляется также, как и у электродинамических амперметров, а расширение шкалы по напряжению аналогично электродинамическим вольтметрам.

При включении электродинамического ваттметра через измерительные трансформаторы напряжения и тока величина измеряемой мощности

$$P = k_u k_i C \alpha, \quad (9)$$

где k_u и k_i — коэффициенты трансформации соответственно измерительных трансформаторов напряжения и тока.

Для отклонения стрелки ваттметра в необходимом направлении следует строго соблюдать правила включения прибора; электрическая энергия должна поступать в прибор со стороны генераторных концов обмоток, которые отмечены звездочками *.

При измерении мощности в трехфазной системе без нулевого провода по схеме двух ваттметров (рис. 11) не исключена возможность отклонения стрелки одного из приборов в обратную сторону даже при соблюдении обычного правила включения ваттметра.

В частности, это бывает в случае равномерной нагрузки фаз при $\cos \varphi < 0,5$.

Для того чтобы стрелка отклонялась в необходимом направлении, удобнее всего переключить концы последовательной обмотки ваттметра и измеряемую мощность записывать со знаком —, т. е. определяя мощность трехфазной системы не как сумму, показываемую ваттметрами, а как их разность.

В некоторых конструкциях ваттметров имеется специальный переключатель с рукояткой, фиксированной в двух позициях + и —, причем знак плюс указывает на то, что мощность, определяемая по отклонению стрелки при нормальной схеме включения прибора (см. рис. 10), положительна, а минус — что ее следует считать отрицательной.

Следует иметь в виду, что в лабораторных условиях предельная длительная перегрузка обмоток электродинамических ваттметров может быть определена из условия, что $I \leq 2 I_n$ и $U \leq 1,15 U_n$.

Приборы этой же системы, имеющие катушки со стальными

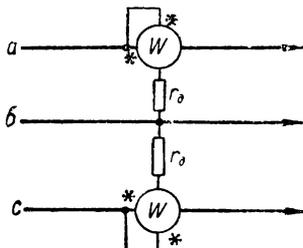


Рис. 11. Схема включения двух ваттметров для измерения мощности в цепи трехфазного тока.

сердечниками, называются ферродинамическими и применяются в качестве ваттметров, частотомеров, фазометров и т. д.

Ферродинамические частотомеры включаются параллельно в цепь переменного тока с напряжением, указанным на шкале прибора, через добавочное устройство (рис. 12), представляющее собой цепи с активными, индуктивными и емкостными сопротивлениями.

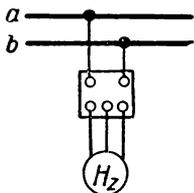


Рис. 12. Схема включения частотомера.

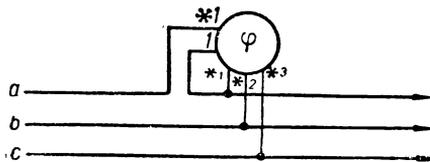


Рис. 13. Схема включения ферродинамического фазометра в цепь трехфазного тока.

На рис. 13 приведена схема включения ферродинамического фазометра в цепь трехфазного тока.

На шкале фазометра также указано номинальные напряжения и ток, на которые рассчитан прибор.

Если напряжение и ток в сети превышают соответствующие номинальные значения прибора, то необходимо включать его через соответствующие измерительные трансформаторы напряжения и тока.

При включении фазометра надо следить за тем, чтобы подводящие концы подходили к генераторным концам, отмеченных индексами * с соблюдением указанной последовательности фаз.

Существующая последовательность фаз проверяется при помощи фазоуказателя (см. лабораторную работу № 11).

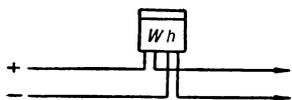


Рис. 14. Схема включения счетчика электрической энергии.

Правильные показания фазометры трехфазного тока дают только при строгой симметрии линейных напряжений и токов нагрузки отдельных фаз.

В цепях постоянного тока применяются счетчики электрической энергии электродинамической системы, которые включаются по схеме, представленной на рис. 14.

Приборы индукционной системы

Приборы индукционной системы (табл. 1), основанные на принципе вращающего или бегущего магнитного поля, применяются в цепях переменного тока определенной частоты, главным образом, как технические ваттметры и счетчики электрической энергии переменного тока.

Преимуществами данных приборов является высокая надежность их в работе, прочность конструкции, значительная перегрузочная способность, равномерная шкала, охватывающая дугу до 280—300°.

К недостаткам следует отнести зависимость показаний от величины приложенного напряжения, частоты и температуры окружающей среды.

На рис. 15 показана схема включения ваттметра для трехпроводной трехфазной сети.

На ваттметрах и счетчиках обычно указывают номинальные значения напряжения и тока, для которых предназначены эти приборы.

Расширение пределов измерений индукционных приборов осуществляется за счет использования измерительных трансформаторов напряжения и тока.

Счетчики индукционной системы изготавливаются как однофазного, так и трехфазного токов для трех- и четырехпроводной сети.

Счетчики однофазного тока обычно включаются по схеме, представленной на рис. 14.

Схемы прямого включения счетчика активной энергии трехфазного тока, а также через измерительные трансформаторы напряжения и тока приведены на рис. 16.

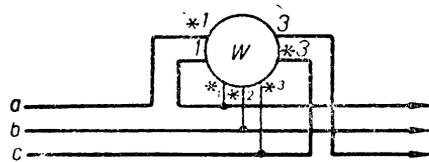


Рис. 15. Схема включения ваттметра трехфазного тока.

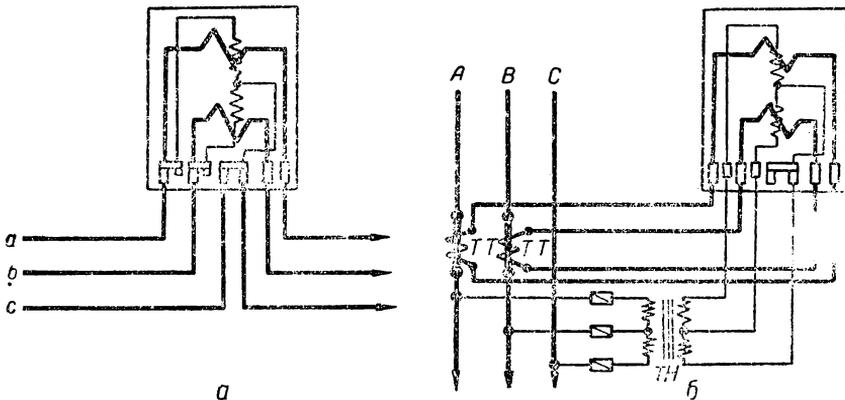


Рис. 16. Схема включения счетчика трехфазного тока: а — прямое, б — через измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Постоянная счетчика находится по формуле

$$C = \frac{3600 \cdot 1000}{N'} , \quad (10)$$

где C — количество электроэнергии, отвечающее одному обороту диска, *вт-сек/об*;

N' — число оборотов диска, соответствующее 1 *квт-ч* электроэнергии.

Имеются аналогичные счетчики для измерения реактивной электроэнергии.

Приборы тепловой системы

Приборы тепловой системы (табл. 1) основаны на принципе удлинения проводника при его нагревании, когда по нему протекает измеряемый ток.

Применяются они в основном для измерений токов и напряжений в цепях постоянного и переменного тока нормальной и высокой частоты.

Шкала у тепловых вольтметров и амперметров неравномерная, приближающаяся к квадратичной.

Показания этих приборов практически не зависят от изменения частоты, а внешние магнитные и электрические поля также не оказывают на них влияния.

Недостатком приборов является недопустимость перегрузки и значительное потребление мощности.

Расширение пределов измерений осуществляется применением шунтов и добавочных сопротивлений.

Приборы электростатической системы

Приборы электростатической системы (табл. 1) основаны на взаимодействии электрически заряженных тел. Применяются они в цепях постоянного и переменного токов как вольтметры и имеют неравномерную шкалу.

Преимуществом электростатических вольтметров является малое потребление мощности.

Из различных внешних факторов на показания приборов этой системы оказывает влияние лишь электрическое поле.

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В электротехнических лабораториях при испытаниях и различных исследованиях, кроме электроизмерительных приборов, часто приходится пользоваться регулировочными и нагрузочными реостатами и трансформаторами, реактивными катушками, конденсаторами и прочей аппаратурой.

Каждый такой аппарат характеризуется своими номинальными данными: напряжением, током, сопротивлением и т. д.

При всех эксплуатационных режимах необходимо следить за тем, чтобы напряжение и ток, которым подвержен данный аппарат, не превышали номинальных значений этих же величин, приведенных в его паспорте.

Реостаты

Регулировочные реостаты бывают: одиночные, двойные, счетверенные.

Одиночные регулировочные реостаты с ползунком имеют три зажима и для регулирования тока в электрической цепи могут включаться по двум схемам, приведенным на рис. 17 а, б.

Обе схемы равноценны, однако вторая исключает случайные размыкания цепи из-за плохого прилегания ползунка к виткам обмотки реостата и применима в тех случаях, когда такой разрыв нежелателен.

При работе с проволочными реостатами, во избежание их перегоя, необходимо следить за тем, чтобы протекающий ток не превышал номинального значения тока, на которое рассчитан реостат.

Обмотки двойных реостатов могут включаться последовательно (рис. 18,а) или параллельно (рис. 18,б).

Первая схема включения применяется, когда сопротивление должно быть больше сопротивления одного реостата, а вторая — когда регулируемый ток I превышает номинальный ток одного реостата I_n и находится в пределах $I_n < I < 2 I_n$.

Регулировочные реостаты можно включать и по схеме делителя напряжения (рис. 19).



Рис. 17. Схема включения регулирующего реостата с ползунком: а — с двумя зажимами (обмотки реостата и ползунка); б — с тремя зажимами.

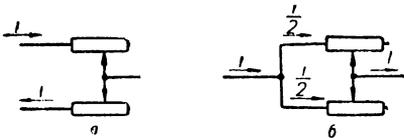


Рис. 18. Схемы включения двойных регулировочных реостатов с ползунком.

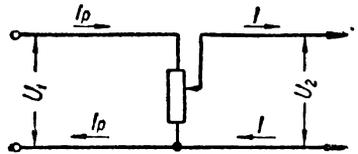


Рис. 19. Схема включения делителя напряжения.

В этом случае вся обмотка реостата включается на напряжение U_1 , а от одного конца ее и зажима ползунка отводится электрическая энергия при напряжении U_2 , величина которого зависит от места расположения ползунка и может изменяться от нуля до U_1 .

Реостат, включенный по схеме делителя напряжения, должен выбираться на ток

$$I_p = \frac{U_1}{r} + I, \quad (11)$$

где U_1 — напряжение, подведенное к зажимам обмотки реостата;

r — сопротивление обмотки реостата;
 I — ток нагрузки со стороны напряжения U_2 .

Регулировочные реостаты могут включаться по схеме делителя напряжения только в том случае, если напряжение сети

$$U_1 < I_n r,$$

где I_n — номинальный ток реостата.

В качестве нагрузочных реостатов применяют ламповые и секционированные проволочные реостаты, схемы которых показаны на рис. 20.

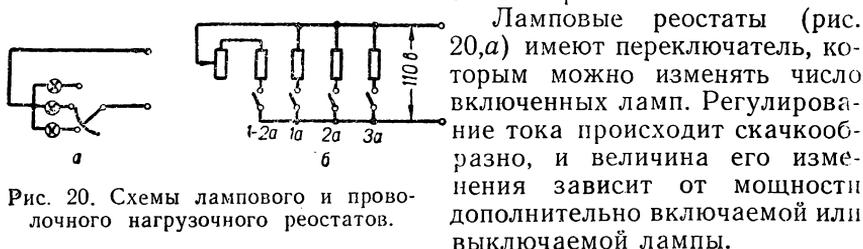


Рис. 20. Схемы лампового и проволочного нагрузочного реостатов.

Ламповые реостаты (рис. 20, а) имеют переключатель, которым можно изменять число включенных ламп. Регулирование тока происходит скачкообразно, и величина его изменения зависит от мощности дополнительно включаемой или выключаемой лампы.

Плавное регулирование тока можно обеспечить проволочным реостатом (рис. 20, б), у которого отдельные секции, имеющие разные сопротивления, включаемые однополюсными рубильниками, дают определенную нагрузку, а одна из секций имеет реостат с ползунком, который позволяет плавно изменять величину тока от I_{\min} до I_{\max} .

Для реостата, изображенного на рис. 20, б, при напряжении на его зажимах 110 в можно плавно изменять нагрузочный ток в пределах $I \equiv (1 - 8) a$.

При больших нагрузках, в частности при испытаниях генераторов постоянного и переменного токов, используют двух- и трехполюсные нагрузочные жидкостные реостаты (рис. 21, а, б).

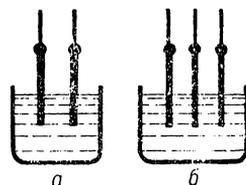


Рис. 21. Схемы нагрузочных жидкостных реостатов: а — двухполюсных; б — трехполюсных.

Последние представляют собой бак с 10—15%-ным водным раствором соды, в который опущены металлические (стальные) пластины.

Изменяя глубину погружения пластин в жидкость, можно регулировать сопротивление реостата, а следовательно, и величину нагрузки на испытуемое устройство.

Регулировочные и нагрузочные трансформаторы и автотрансформаторы

При цепях переменного тока, кроме реостатов, могут применяться специальные регулировочные трансформаторы и автотрансформаторы.

В качестве регулировочного трансформатора может быть использован трансформатор с однослойной вторичной обмоткой, по зачищенной от изоляции поверхности которой скользит ползунок (рис. 22).

В зависимости от положения ползунка изменяется величина напряжения U_2 .

Выпускаются лабораторные регулировочные автотрансформаторы типов ЛАТР-1 и ЛАТР-2, которые состоят из кольцеобразного стального сердечника, обмотанного слоем медной проволоки.

От обмотки сделано несколько постоянных отводов и на поверхности очищена от изоляции узкая дорожка, по которой перемещается подвижной угольный контакт.

Автотрансформаторы типа ЛАТР (рис. 23) рассчитаны на два напряжения со стороны входа: 127 и 220 в, причем ЛАТР-1 предназначается для нагрузочного тока до 2 а, а ЛАТР-2 — для токов до 9 а.

Помимо регулировочных устройств, основанных на явлении взаимной индукции, изготавливаются нагрузочные трансформаторы, которые занимают промежуточное положение между измерительными трансформаторами тока и обычными силовыми трансформаторами.

Вторичные обмотки таких трансформаторов имеют небольшое число витков, но рассчитаны на большой ток.

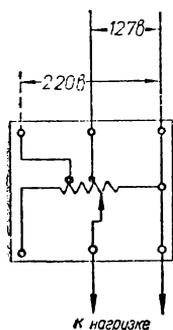


Рис. 23. Схема лабораторного регулировочного автотрансформатора типа ЛАТР.

Первичные обмотки подключаются к питающей сети через реостат r_p , который служит для регулирования нагрузочного тока, измеряемого амперметром, включенным во вторичную цепь (рис. 24).

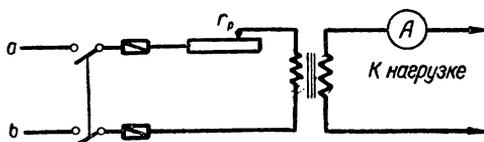


Рис. 24. Схема включения нагрузочного трансформатора.

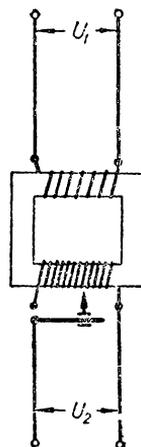


Рис. 22. Схема регулировочного трансформатора с ползунком.

Реактивные катушки

Реактивные катушки, применяемые в электротехнических лабораториях, бывают без стального сердечника, с неизменной ферромагнитной цепью и с выдвижным сердечником.

Характеризуются они следующими параметрами: активным сопротивлением r , индуктивностью L и номинальным током I_n .

Катушки, не имеющие стального сердечника, обладают определенной неизменной индуктивностью L , которую можно изменять только в том случае, когда катушка секционирована.

Такие катушки, а также катушки с разомкнутой ферромагнитной цепью имеют сильно развитое магнитное поле, которое может оказывать влияние на близко расположенные электроизмерительные приборы.

Поэтому эти катушки следует располагать на достаточном расстоянии, как от электроизмерительных приборов, так и друг от друга.

Катушки со стальным сердечником имеют непостоянную индуктивность L и представляют собой нелинейное сопротивление.

Наличие выдвижного ферромагнитного сердечника дает возможность изменять реактивное сопротивление катушки в довольно широких пределах.

Конденсаторы

Отдельные конденсаторы и конденсаторные батареи, используемые в электрических цепях, характеризуются величиной емкости C и рабочим напряжением $U_{\text{раб}}$.

Конденсаторные батареи часто снабжаются переключающими устройствами, которые позволяют в довольно широких пределах относительно плавно изменять величину емкости батареи.

Перед началом работы конденсаторная батарея должна быть разряжена во избежание возможного поражения током от остаточного заряда, сохранившегося при отсоединении ее от какого-либо источника электрической энергии.

Тормозы

Для испытания электродвигателей под нагрузкой в лабораториях часто пользуются механическими (ленточными, колодочными) и электромагнитными тормозами (см. лабораторные работы 21 и 25).

Секундомеры

Для измерения небольших отрезков времени применяются обычные секундомеры с пружинным заводом.

Они имеют две стрелки, из которых одна обходит весь большой циферблат в течение 60 сек. (иногда 30 сек.), а другая — малый циферблат за 30 мин. (или соответственно 15 мин.).

Управление стрелками производится вручную с помощью кнопки, находящейся в заводной головке секундомера.

При первом нажатии на кнопку начинают перемещаться обе стрелки, при втором — обе останавливаются и при третьем — возвращаются в исходное положение.

Если надо измерить время, начиная от одной десятой доли секунды до нескольких секунд, пользуются электрическими секундомерами, которые работают на переменном токе.

Электрический секундомер имеет две стрелки — большую и малую, которые приводятся в движение маленьким синхронным электродвигателем, встроенным в корпус секундомера.

Приводной синхронный электродвигатель включается в сеть переменного тока через добавочные сопротивления r_1 и r_2 на напряжение 110 или 220 в (рис. 25).

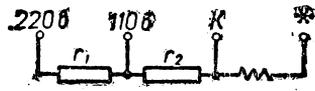


Рис. 25. Схема электрического секундомера.

Большая стрелка секундомера делает полный оборот за 1 сек. и позволяет измерять время с точностью до 0,1 и даже 0,05 сек., а малая — за 10 сек.

Пуск электрического секундомера осуществляется включением его в сеть переменного тока, а остановка — отключением или замыканием накоротко зажимов синхронного электродвигателя.

При нажатии кнопки возврата находящейся на боковой стенке прибора, стрелки приводятся в исходное положение.

Данный тип секундомера дает правильные показания только при частоте переменного тока 50 гц.

Тахометры

Для определения скорости вращения вала электрической машины пользуются центробежными тахометрами со встроенной коробкой скоростей, позволяющей изменять пределы измерения прибора. Конец вала тахометра вставляется в центр вала машины таким образом, чтобы его ось совпала с осью машины и по шкале прибора производят отсчет.

Тахометр должен присоединяться к валу испытываемой машины *на короткое время*, без сильного нажатия, так как в противном случае он может преждевременно выйти из строя.

Изменение пределов измерений достигается переключением в коробке скоростей соответствующих шестерен.

Последнее можно делать только в том случае, когда тахометр не соединен с вращающимся валом машины.

Скорость вращения вала асинхронной машины определяют при помощи стробоскопического диска, освещаемого неоновой лампой (см. лабораторную работу № 23).

Термометры и термометры

Измерение температуры окружающей среды и некоторых частей машин и аппаратов производится жидкостными термометрами.

Ртутными термометрами можно пользоваться только при отсутствии переменных магнитных полей в зоне установки термометра.

В противном случае следует использовать спиртовые термометры.

В малодоступных для установки термометра местах монтируют термометры, а иногда термометры сопротивления, при помощи которых можно достаточно точно измерять перегрев той или иной части над окружающей средой.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ

Индивидуальные источники питания в виде кислотных и щелочных аккумуляторов, а также выпрямителей небольшой мощности, применяются в лабораториях сравнительно редко.

В основном электроэнергию получают от общих источников питания, от которых расходятся электрические сети к отдельным щиткам рабочих мест.

На этих щитках смонтированы двух- и трехполюсные рубильники с предохранителями и клеммами, около которых имеются бирки с обозначениями рода тока и величины напряжения (рис. 26).

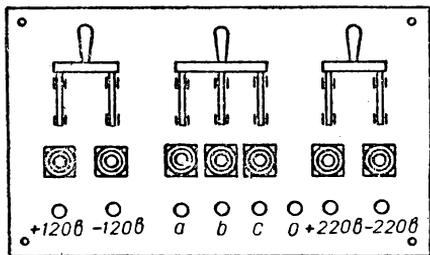


Рис. 26. Щиток отдельного рабочего места.

Обычно в электротехнических лабораториях к рабочим местам подводится напряжение от городской сети трехфазного тока $a, b, c, 0$ (желательно не выше $220/127$ в), а также напряжение постоянного тока 110 или 220 в.

К отдельным рабочим местам, если в этом имеется особая необходимость, может подводиться переменный ток напряжением 36 или 220 в при частоте 200 гц.

Удобно иметь в лаборатории индукционный регулятор

(рис. 27) мощностью 5—30 ква, которым можно было бы преобразовывать симметричную трехфазную систему линейных напряжений 220 в, 50 гц, получаемую от энергосистемы, в аналогичную систему при регулируемом напряжении 100—400 в, которая могла бы обеспечивать питание отдельных щитков рабочих мест.

Индукционный регулятор обычно монтируют за главным распределительным щитом лаборатории с выводом штурвала управления на переднюю сторону панели.

Если по условиям лабораторных испытаний необходимо иметь трехфазный ток 220 в, 200 гц, целесообразно установить в лаборатории индукционный преобразователь частоты мощностью 3,5 ква (см. лабораторную работу № 32).

Для трехфазного тока с переменной частотой от 30 до 100 гц устанавливают двигатель-генератор (см. лабораторную

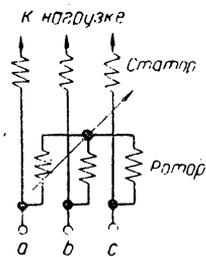


Рис. 27. Схема включения индукционного регулятора.

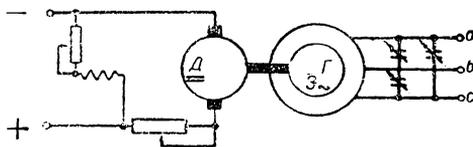


Рис. 28. Принципиальная схема преобразовательной установки с асинхронным генератором при конденсаторном возбуждении.

работу № 30), причем в качестве приводного двигателя удобно взять электродвигатель постоянного тока параллельного или смешанного возбуждения, а в качестве генератора — синхронный генератор трехфазного тока.

При отсутствии последнего можно воспользоваться обычной асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, возбуждая ее при помощи статических конденсаторов, допускающих изменение величины емкости (рис. 28).

Потребная величина фазной емкости при напряжении 220 в и частоте 50 гц составляет при работе на активную нагрузку 15—25 мкф на 1 квт установленной мощности.

При иной частоте f величина емкости должна быть изменена в отношении $\frac{50}{f}$.

Постоянный ток в лабораториях получается от преобразовательных агрегатов: ртутных и селеновых выпрямителей, а также различных двигателей-генераторов и аккумуляторных батарей.

Последние должны устанавливаться в отдельном от лаборатории помещении с соблюдением действующих правил и норм, касающихся аккумуляторных помещений.

Управление преобразовательными устройствами, а также распределением электрической энергии по всей лаборатории ведется обычно с главного распределительного щита (рис. 29).

Центральная панель его служит для приема, контроля и от пуска электроэнергии трехфазного тока. Левая панель обслу-

живает преобразовательные устройства, а правая предназначена для зарядных устройств и аккумуляторного хозяйства.

По электроизмерительным приборам, установленным на щите, можно судить о качестве электрической энергии и загрузке отдельных агрегатов.

Включение и выключение отдельных объектов производится магнитными пускателями, управляемыми кнопками, выведенными на панели главного распределительного щита. Под кнопками имеются надписи, указывающие на их назначение.

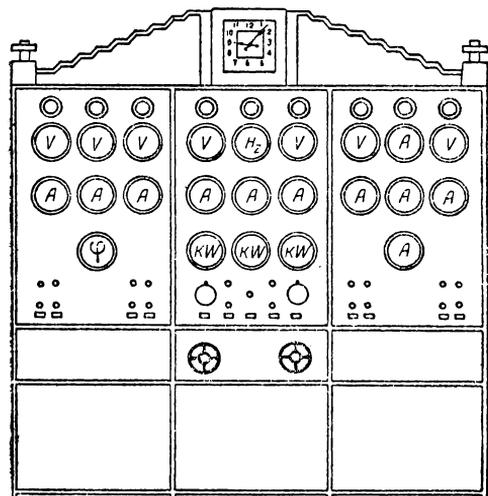


Рис. 29. Внешний вид главного распределительного щита.

Два штурвала служат для привода устройств, обеспечивающих регулирование величины напряжений постоянного и переменного токов.

Сигнальные лампы, смонтированные в верхней части щита, предупреждают работающих в лаборатории о включении тех или иных электротехнических устройств, напоминая о необходимости соблюдения всех правил предосторожности при работе на электротехнических установках.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

РАЗДЕЛ 1

**ПОСТОЯННЫЙ ТОК,
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

Работа № 1

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Цель работы

1. Экспериментально определить величины сопротивления проводов, потери напряжения, потери мощности и коэффициента полезного действия электрической линии в зависимости от величины нагрузки.
2. Произвести подсчет стоимости электроэнергии, поступившей в линию и отданной потребителю, а также стоимость потерь.
3. Установить закон изменения значения эквивалентного сопротивления от числа одинаковых параллельно включенных потребителей.
4. Выяснить влияние величины напряжения на зажимах лампы накаливания на ее электрические параметры.

Основные теоретические положения

Генерирование электрической энергии производится на электрических станциях, где величина напряжения U_1 поддерживается неизменной.

Выработанная электрическая энергия передается при помощи металлических проводов потребителям электрической энергии.

Если последние не подключены, то установка работает в режиме холостого хода и напряжения в начале линии U_1 и в конце ее U_2 будут одинаковы.

При включении нагрузки r_n в конце линии по проводам потечет ток I .

Из-за омического сопротивления проводов $r_{л}$ в электрической линии происходит потеря напряжения ΔU , которая для участка цепи, согласно закону Ома, равна

$$\Delta U = I r_{л}. \quad (1)$$

Из соотношения (1) видно, что потеря напряжения в линии ΔU зависит от тока нагрузки I , и несмотря на то, что напряжение на шинах станции U_1 поддерживается неизменным, напряжение у потребителей U_2 будет изменяться, так как

$$U_2 = U_1 - I r_{л}. \quad (2)$$

Экспериментально величина потери напряжения ΔU может быть определена, как разность показаний вольтметров, один из которых включен в начале электрической линии, а другой в конце ее, т. е.

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (3)$$

Величина сопротивления проводов электрической линии, продолженной от электрической станции к потребителям, определяется на основании закона Ома, как

$$r_{л} = \frac{\Delta U}{I}. \quad (4)$$

Сопротивление проводов электрической линии приводит к тому, что часть мощности, выработанной электростанцией ΔP , затрачивается на их нагревание, в результате чего потребитель получит только часть передаваемой мощности

$$P_2 = P_1 - \Delta P = U_1 I - \Delta U \cdot I = (U_1 - \Delta U) I = U_2 I. \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия электрической линии находится из соотношения

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I}{U_1 I} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (6)$$

Так как напряжение в конце линии U_2 зависит от величины нагрузки P_2 , а величина напряжения на шинах станции U_1 поддерживается неизменной, то из соотношения (6) следует, что к. п. д. электрической линии зависит от числа потребителей, включенных в ее конце.

Величину электрической энергии за определенный промежуток времени t , поступившей в линию — W_1 , отданной потребителям — W_2 и затраченной на нагрев линии ΔW , можно определить по формулам:

$$W_1 = P_1 t, \quad (7)$$

$$W_2 = P_2 t, \quad (8)$$

$$\Delta W = W_1 - W_2. \quad (9)$$

а стоимость ее $S_1, S_2, \Delta S$ определим умножением $W_1, W_2 \Delta W$ на тариф s_0 (коп/квт-ч), по которому отпускается электроэнергия.

Величину нагрузки во время опыта удобно регулировать изменением числа n параллельно включенных ламп накаливания с одинаковыми электрическими параметрами.

При изменении числа n эквивалентное сопротивление ламп $r_э$ будет меняться, так как

$$r_э = \frac{r'}{n}, \quad (10)$$

где r' — электрическое сопротивление нити одной лампы накаливания.

Это будет сказываться на изменении тока в линии I , который в соответствии с первым законом Кирхгофа складывается из равных токов I' , протекающих через каждую лампу,

$$I = I'n, \quad (11)$$

что дает возможность осуществить различные нагрузочные режимы электрической линии.

Описание схемы установки

Для проведения исследования собирают установку (рис. 30), состоящую из двухполюсного рубильника P , плавких предохранителей Π , проволочного реостата с ползунком r_p для регулирования величины напряжения в начале линии U_1 , измеряемого вольтметром V_1 , двух сопротивлений $\frac{r_л}{2}$, эквивалентных сопротивлению электрической линии; вольтметра V_2 и амперметра A , измеряющих напряжение U_2 и ток нагрузки I , а также лампового реостата, обладающего эквивалентным сопротивлением $r_э$.

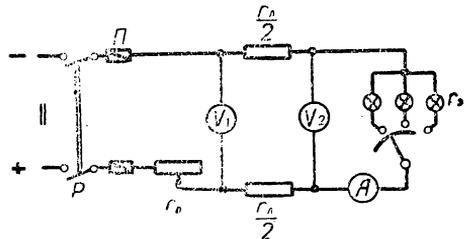


Рис. 30. Схема исследования линии передачи при постоянном первичном напряжении.

Питание установки осуществляется от сети постоянного тока.

Для получения наиболее точных результатов исследования следует выбирать электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы, причем необходимо помнить, что приборы этой системы обладают свойством *полярности*.

Проведение опыта

1. Собрать последовательную часть схемы, а затем присоединить оба вольтметра.

2. После проверки схемы руководителем, замкнуть двухполюсный рубильник P , включить переключателем лампового реостата все лампы, установить регулировочным реостатом r_p напряжение в начале линии U_1 , заданное руководителем, и записать показания всех приборов.

3. Выключить одну лампу в ламповом реостате, отрегулировать напряжение в начале линии U_1 до первоначального значения и снова записать показания всех приборов.

4. В дальнейшем, выключая все время по одной лампе, записывать показания всех приборов и свести нагрузку к нулю.

Примечание. При всех опытах напряжение в начале линии должно поддерживаться неизменным.

5. Данные наблюдения свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение, в		Ток нагрузки I, a	Число включенных ламп n , шт.	Примечание
	в начале линии U_1	в конце линии U_2			
1					Номинальные данные лампы накаливания: Напряжение $U_n = в$; Мощность $P_n = вт$
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при опыте, и привести ее технические данные.

Обработка результатов испытания

Пользуясь результатами наблюдений и соответствующими теоретическими данными, рассчитать для всех произведенных опытов:

1. Потерю напряжения в электрической линии ΔU , сопротивление проводов r_d , подводимую мощность P_1 , мощность, потреб-

лَّهُмую всеми потребителями, P_2 и одной лампой P' , потерю мощности в линии ΔP , в п. д. электрической линии η , эквивалентное сопротивление нагрузки r_0 , в сопротивление одной лампы r' .

2. Результаты наблюдений и расчетов свести в одну таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений				Результаты вычислений								
	$U_1, в$	$U_2, в$	$I, а$	$n, шт.$	$\Delta U, в$	$r_n, Ом$	$P_1, вт$	$P_2, вт$	$P', вт$	$\Delta P, вт$	η	$r_0, Ом$	$r', Ом$
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													

3. Построить в одной координатной системе графические зависимости: $U_2 = f(I)$, $\Delta U = f(I)$, $\Delta P = f(I)$ при $U_1 = \text{const}$ и найти номинальные данные $U_{2н}$, ΔU_n , ΔP_n , принимая наибольший ток нагрузки равным номинальному току установки.

4. Подсчитать стоимость электроэнергии, отпущенной станцией — S_1 , потребленной лампами накаливания — S_2 , затраченной на нагрев линии передачи — ΔS , если установка работает в течение квартала непрерывно при номинальном токе и тарифе на электроэнергию $s_0 = 25 \text{ коп/квт-ч}$.

5. Вычертить графические зависимости $I = f(n)$, $P_2 = f(n)$, $r_0 = f(n)$ в одной координатной системе и $I = f(r_0)$ при $U_1 = \text{const}$ в другой координатной системе.

6. Объяснить причины отклонения величин сопротивления и мощности, потребляемой лампой накаливания, от номинальных данных при различном напряжении U_2 .

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 13—17, 22—23, 25—29, 32—33, 348—349.
 Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 47—54, 56—59, 64—65, 68—70, 659—661, 712—715.
 Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 27—36, 42—44, 522—524, 603—607.

ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ЗАКОНОВ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы

1. Экспериментальным путем найти распределение токов и напряжений в разветвленных цепях постоянного тока.
2. Проверить справедливость законов Кирхгофа в сложных цепях постоянного тока.
3. Определить внутреннее сопротивление источников электрической энергии.

Основные теоретические положения

Расчет сложных электрических цепей постоянного тока сводится к нахождению токов и напряжений на отдельных участках по заданным величинам действующих электродвижущих сил e_1 и e_2 , внутренних сопротивлений источников электрической энергии



Рис. 31. Токораспределение в сложной цепи постоянного тока.

Применительно к узлу M уравнение первого закона Кирхгофа будет иметь вид

$$I_1 + I_2 = I. \tag{1}$$

Так как число неизвестных превышает число уравнений, то дополнительные независимые уравнения составляются на основании второго закона Кирхгофа.

Применяя его к замкнутому контуру $ABCD$, при обходе его по часовой стрелке, получим

$$e_1 - e_2 = I_1 r_0' + I_1 r' - I_2 r_0'', \tag{2}$$

а при обходе замкнутого контура $MBCN$ против часовой стрелки

$$e_2 = I r + I_2 r_0''. \tag{3}$$

Решив систему уравнений (1), (2) и (3), найдем токи на отдельных участках цепи, представленной на рис. 31.

В частности, ток аккумуляторной батареи $Ак_2$

$$I_2 = \frac{e_2 (r_0' + r) - (e_1 - e_2) r}{(r_0' + r_0'' + r') r + r_0' + r}. \tag{4}$$

Из уравнения (4) видно, что величина и направление тока I_2 аккумуляторной батареей $A\kappa_2$, имеющей меньшую электродвижущую силу e_2 , чем источник электрической энергии $A\kappa_1 - e_1$, будет зависеть от величины нагрузочного сопротивления r .

При больших значениях нагрузочного сопротивления r справедливо неравенство

$$e_2 (r_0' + r') - (e_1 - e_2)r < 0, \quad (5)$$

ток I_2 будет отрицателен, т. е. его направление окажется противоположным, указанному на рис. 31, и аккумуляторная батарея $A\kappa_2$ будет заряжаться.

При данном режиме, в рассматриваемой схеме, источником электрической энергии является только аккумуляторная батарея $A\kappa_1$, которая будет отдавать энергию всем сопротивлениям схемы, а также аккумуляторной батарее $A\kappa_2$.

С возрастанием нагрузки, т. е. при уменьшении величины нагрузочного сопротивления r , зарядный ток I_2 начнет уменьшаться и станет равным нулю, когда

$$e_2 (r_0' + r') - (e_1 - e_2) r = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) определим то значение сопротивления нагрузки r_* , при котором второй источник $A\kappa_2$ находится в режиме холостого хода, как

$$r_* = \frac{e_2 (r_0' + r')}{e_1 - e_2}. \quad (7)$$

Величину r_* можно найти на основании закона Ома для участка цепи MN , как отношение напряжения между точками M и N к току I при условии, что $I_2 = 0$, т. е.

$$r_* = \frac{U_{MN}}{I}. \quad (8)$$

Если нагрузочное сопротивление r будет меньше r_* , то

$$e_2 (r_0' + r) - (e_1 - e_2)r > 0 \quad (9)$$

и ток I_2 изменит свое направление на противоположное. Питание нагрузочного сопротивления r в этом случае будет идти от обоих источников электрической энергии $A\kappa_1$ и $A\kappa_2$.

Для всех вышеуказанных режимов будут соблюдаться в пределах точности показаний электроизмерительных приборов соотношения (1) и (2).

Выражение

$$e_1 - e_2 = I_1 r_0' + I_1 r' - I_2 r_0''$$

для экспериментальной проверки удобно записать так:

$$(e_1 - I_1 r_0') - (e_2 - I_2 r_0'') = I_1 r' \quad (10)$$

или

$$U_1 - U_2 = U', \quad (11)$$

где U_1 и U_2 — соответственно напряжения аккумуляторных батарей Ak_1 и Ak_2 ;

U' — напряжение на концах добавочного сопротивления r' .

Так как напряжение любой аккумуляторной батареи

$$U_i = e_i - I_i r_{oi} n_i, \quad (12)$$

где e_i — электродвижущая сила аккумуляторной батареи;

I_i — ток аккумуляторной батареи;

r_{oi} — внутреннее сопротивление одного аккумулятора;

n_i — число последовательно соединенных одинаковых аккумуляторов, то внутреннее сопротивление одного аккумулятора, входящего в батарею,

$$r_{oi} = \frac{e_i - U_i}{I_i n_i}. \quad (13)$$

Описание схемы установки

Для проведения исследования собрать установку, состоящую из выпрямителя переменного тока B и аккумуляторной батареи Ak , причем предполагается, что выпрямитель находится на

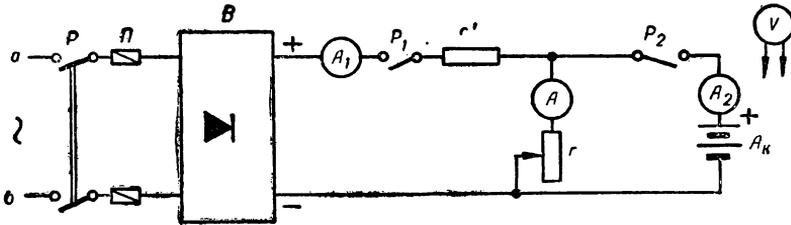


Рис. 32. Схема проверки законов Кирхгофа.

значительном расстоянии от переменного нагрузочного сопротивления r , а батарея — в непосредственной близости от него (рис. 32).

Для учета сопротивления линии, идущей от выпрямителя B со стороны постоянного тока к переменному нагрузочному сопротивлению r , в схеме предусмотрено добавочное сопротивление r' , эквивалентное сопротивлению линии.

Электродвижущая сила выпрямителя e_1 больше электродвижущей силы аккумуляторной батареи e_2 .

Измерение токов выпрямителя I_1 , аккумуляторной батареи I_2 и нагрузки, производится тремя амперметрами A_1 , A_2 , A , причем, учитывая возможный режим работы аккумуляторной батареи A_k (заряд-разряд), амперметр A_2 берется с нулем посредине шкалы.

Электродвижущие силы и напряжения измеряют вольтметром V со щупами.

Для получения наиболее точных результатов измерения следует выбирать электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы, причем необходимо помнить о том, что эти приборы *полярны*.

Включение и выключение отдельных источников электрической энергии производятся однополюсными рубильниками P_1 и P_2 .

Проведение опыта

1. Собрать замкнутую цепь, содержащую источники электрической энергии B и A_k , а затем присоединить к ней ветвь с амперметром A и нагрузкой r .

2. После проверки схемы руководителем, измерить вольтметром V со щупами электродвижущие силы выпрямителя и аккумуляторной батареи.

Измерение производить при разомкнутых однополюсных рубильниках P_1 и P_2 !

Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Электродвижущая сила, в		Число аккумуляторов в батарее n , шт.
	e_1	e_2	
1			

3. Поставить ползунок нагрузочного реостата r в положение, отвечающее его наибольшему сопротивлению и включить однополюсные рубильники P_1 и P_2 .

Величина сопротивления r подобрана так, что она больше r_* , поэтому аккумулятор A_k будет заряжаться и показания амперметра A_2 будут отрицательными.

После записи отсчетов по всем амперметрам измерить и записать величины напряжений источников электрической энергии, а также разность потенциалов на концах сопротивления r .

4. Отрегулировать величину нагрузочного сопротивления r так, чтобы ток I_2 был равен нулю, измерить и записать те же величины.

5. Уменьшить величину r до значения $r < r_*$, при котором оба источника электрической энергии будут питать нагрузочное сопротивление r , и сделать отсчеты по всем приборам.

6. Данные наблюдений по пунктам 3, 4, 5 свести в таблицу.

№ опы- тов	Ток, a			Напряжения, b			Режим работы аккумуляторной батареи Ak
	I_1	I_2	I	U_1	U_2	U'	
1							Заряд
2							Холостой ход
3							Разряд

7. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опыта, с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Пользуясь результатами наблюдений, подсчитать для всех произведенных опытов величины:

$$\Delta I = I - I_1 - I_2 \quad (14)$$

$$\text{и } \Delta U = U_1 - U_2 - U', \quad (15)$$

которые теоретически должны быть равны нулю, но практически могут отличаться от него на величину, не превышающую погрешности, вносимой из-за неточности электроизмерительной аппаратуры.

2. Для одного из опытов, где $\Delta I \neq 0$ или $\Delta U \neq 0$, подсчитать возможную погрешность, вносимую электроизмерительной аппаратурой, и сравнить ее с полученной величиной ΔI или ΔU .

3. Применив формулу (13), рассчитать для всех опытов величину внутреннего сопротивления одного аккумулятора r_{oi} , приняв за окончательное его значение среднее арифметическое из найденных значений.

4. Результаты расчетов по пунктам 1 и 3 свести в таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений						Результаты вычислений			Режим
	I_1, a	I_2, a	I, a	U_1, b	U_2, b	U', b	$\Delta I, a$	$\Delta U, b$	$r_{oi}, Ом$	
1										Заряд
2										Холостой ход
3									Среднее: $r_{oi} = Ом$	Разряд

5. Пользуясь формулой (8), вычислить величину сопротивления нагрузки r_n , при котором ток $I_2 = 0$.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 17—22, 24—25, 30—33, 35—36, 117—119.
Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 59—70, 79—87, 619—622.
Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 30—42, 501—503.

Работа № 3

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Цель работы

1. Экспериментальным путем определить сопротивление нагревательного элемента электрической плитки и поглощаемой им мощности.
2. Построить кривые коэффициента полезного действия электронагревательного прибора в зависимости от времени и температуры.
3. Определить форму кривой нагрева и величину постоянной времени нагрева электронагревательного прибора.
4. Подсчитать стоимость кипячения 1 л воды при существующем тарифе на отпуск электрической энергии.

Основные теоретические положения

При прохождении электрического тока по проводникам последние нагреваются. Количество тепла, выделяемого в проводниках, может быть определено по закону Ленца — Джоуля из формулы

$$Q = 0,24 I^2 r t, \quad (1)$$

где Q — количество выделяемого тепла, *кал*;
 I — ток, протекающий по проводнику, *а*;
 r — сопротивление проводника, *ом*;
 t — время протекания тока, *сек*.

Формулу (1) можно представить в следующем виде:

$$Q = 0,24 U I t, \quad (2)$$

где U — разность потенциалов на концах того проводника, в котором наблюдают тепловой эффект, *в*
или

$$Q = 0,24 P t, \quad (3)$$

где P — мощность, затрачиваемая на нагрев проводника, по которому протекает электрический ток, *вт*.

Тепловая энергия Q , выделяемая в проводнике, по которому протекает электрический ток I , идет на повышение температуры проводника и частично отдается в окружающую среду.

Энергия Q' , которая затрачивается на повышение температуры проводника на $d\vartheta^\circ$, может быть подсчитана по его удельной теплоемкости c и массе G , как

$$Q' = cGd\vartheta = Cd\vartheta, \quad (4)$$

где C — теплоемкость проводника *кал/град*.

Тепловая энергия Q'' представляет собой тепло, которое передается в окружающую среду посредством теплопроводности, конвекции и излучения.

Тепло, передающееся в окружающую среду посредством теплопроводности, пропорционально первой степени перегрева проводника над окружающей средой, конвекционное тепло пропорционально перегреву в степени 1,25, а тепло, передаваемое излучением, пропорционально четвертой степени перегрева.

Обычно перегрев проводников над окружающей средой невелик. Это дает возможность считать в первом приближении, что передача тепла в окружающую среду происходит посредством теплопроводности.

Тогда количество тепла, переданное в окружающую среду, будет

$$Q'' = A\vartheta dt, \quad (5)$$

где A — теплоотдача проводника, т. е. тепло, отдаваемое поверхностью проводника за единицу времени при разности температур 1° ;

ϑ — температура проводника;

dt — время.

Уравнение теплового состояния проводника, по которому протекает электрический ток, будет

$$Q_0 dt = Q' + Q'', \quad (6)$$

где Q_0 — количество тепла, выделяющееся в проводнике за единицу времени.

С учетом уравнений (4) и (5), уравнение (6) можно представить в следующем виде:

$$Q_0 dt = Cd\vartheta + A\vartheta dt, \quad (7)$$

откуда

$$dt = C \frac{d\vartheta}{Q_0 - A\vartheta}. \quad (8)$$

Проинтегрировав (8), после несложных преобразований, получим уравнение перегрева проводника над окружающей средой

$$\vartheta = \frac{Q_0}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \vartheta_0 e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (9)$$

где ϑ_0 — начальный перегрев проводника над окружающей средой, град.,

$T_n = \frac{C}{A}$ — постоянная времени нагрева, сек.

Обозначив

$$\vartheta_k = \frac{Q_0}{A} \quad (10)$$

и предположив, что в начальный момент температура проводника равна температуре окружающей среды, т. е., что $\vartheta_0 = 0$, уравнение можно представить в следующем виде:

$$\vartheta = \vartheta_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right). \quad (11)$$

Приведенное уравнение показывает, что температура перегрева проводника или другого однородного тела над окружающей средой растет по кривой 0—1 (рис. 33) и практически тепловое равновесие устанавливается по истечении времени

$$t_0 = (3 \div 5) T_n. \quad (12)$$

При охлаждении однородного тела уравнение (7) примет такой вид:

$$0 = Cd\vartheta + A\vartheta dt, \quad (13)$$

проинтегрировав которое, получим

$$\vartheta = \vartheta_k e^{-\frac{t}{T_n}}. \quad (14)$$

Графически процесс охлаждения изображается кривой 2—3 и заканчивается практически за то же время, что и процесс нагревания $t_0 = (3 \div 5) T_n$.

Величину постоянной времени нагрева и охлаждения — T_n находим из соответствующих кривых, как подкасательную к ним (рис. 33).

Действительные кривые нагрева и охлаждения проводов, электронагревательных приборов, машин и аппаратов не вполне соответствуют полученным теоретическим кривым вследствие

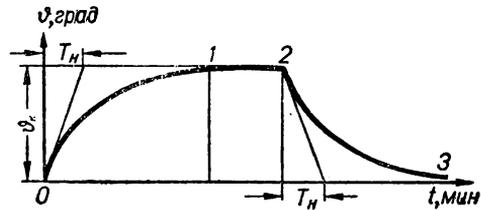


Рис. 33. Кривая нагрева (0—1), установившегося состояния (1—2) и охлаждения (2—3) однородного тела.

целого ряда неучтенных явлений, как-то: неоднородности тела, конвекционного тепла, теплоизлучения в окружающую среду, изменения величины удельной теплоемкости с температурой и др.

Тепловой эффект, наблюдаемый в проводниках, по которым протекает электрический ток, может вызвать в отдельных случаях перегрев их выше допусаемых норм, в результате чего наступает разрушение изоляции и даже плавление самих проводов. Кроме того, повышение температуры проводников воздушных линий приводит к уменьшению их механической прочности.

Однако не исключена возможность использования теплового эффекта в электронагревательных приборах, электрическом освещении, электросварке, электроизмерительных приборах и т. п.

В электрических водонагревательных приборах не все выделяемое тепло передается нагреваемой жидкости. О качестве электронагревательного прибора судят по его коэффициенту полезного действия η , понимая под ним отношение тепла Q_2 , полученного подогреваемой жидкостью, к теплу Q_1 , выделенному электрическим током в нагревательном элементе прибора, то есть

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (15)$$

$$Q_2 = cG(\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad (16)$$

$$Q_1 = 0,24 UIt,$$

где c — удельная теплоемкость нагреваемой жидкости;

G — масса жидкости;

ϑ_1 — начальная температура жидкости;

ϑ_2 — температура жидкости в процессе ее нагревания;

t — время, прошедшее от начала экспериментирования до того момента, когда температура жидкости стала ϑ_2 .

Так как с течением времени температура жидкости ϑ_2 постепенно увеличивается и изменяются условия теплообмена между нагревательным элементом, жидкостью и окружающей средой, коэффициент полезного действия η не остается постоянной величиной и является некоторой функцией температуры ϑ_2 , а следовательно, и времени t .

В начале нагрева к. п. д. будет увеличиваться, а затем, после достижения температурой ϑ_2 некоторого значения, начнет уменьшаться вследствие значительных потерь тепла в окружающую среду.

Экономичность работы электронагревательного прибора можно установить по стоимости кипячения одного литра воды, определяемой по расходу электрической энергии, затрачиваемой на данный процесс.

Если показание счетчика в начале опыта было W_1 , а в конце W_2 , то израсходованная энергия в *квт-ч* на кипячение G литров жидкости представится разностью

$$W = W_2 - W_1, \quad (17)$$

что при установленном тарифе s_0 , коп/квт-ч определить стоимость кипячения одного литра жидкости в копейках

$$S = \frac{W}{G} s_0.$$

Описание схемы установки

Для проведения опыта собрать установку (рис. 34), состоящую из двухполюсного рубильника P , плавких предохранителей Π , проволочного реостата с ползунком r_p для регулировки величины напряжения U , измеряемого вольтметром V , амперметра A , измеряющего ток I , потребляемый электронагревательным прибором r , и счетчика электрической энергии Wh , измеряющего работу электрического тока, протекающего по обмотке нагревательного элемента электрической плитки.

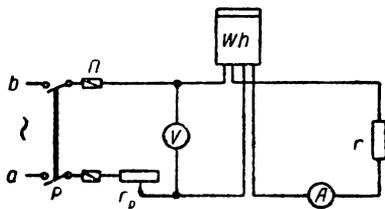


Рис. 34. Схема испытания электронагревательного прибора.

Питание установки производится от сети переменного тока $a-b$. Вольтметр и амперметр могут быть взяты электромагнитной системы, а счетчик электрической энергии — индукционной.

Количество нагреваемой жидкости отмеривают мензуркой. Температуру жидкости определяют максимальным жидкостным термометром, а время регистрируют секундной стрелкой пружинных часов или секундомером.

Проведение опыта

1. Собрать последовательную часть схемы, после чего присоединить вольтметр V .

2. Наполнить сосуд заданным количеством воды G , см³.

3. Сосуд, наполненный водой, установить на электрическую плитку, полностью ввести регулировочный реостат r_p и, после проверки схемы руководителем, замкнуть двухполюсный рубильник P .

Одновременно с этим необходимо измерить начальную температуру воды ϑ_1 и записать показание счетчика W_1 .

4. При помощи регулировочного реостата r_p поддерживать в течение всего опыта величину напряжения U постоянной и записывать через каждые три минуты показания амперметра A и термометра ϑ_2 , причем перед каждым отсчетом по термометру нагреваемую жидкость следует тщательно перемешивать.

Наблюдение вести до того момента, пока не закипит вода, после чего рубильник выключить и записать конечное показание счетчика электрической энергии W_2 .

Данные наблюдения свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Ток $I, а$	Время $t, сек.$	Температура воды $\vartheta_2, град.$	Показания счетчика $W, кВт-ч$
1					
2					—
3					—
4					—
5					—
6					—
7					—
8					—

5. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опыта с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Пользуясь результатами наблюдений и необходимыми теоретическими формулами, рассчитать для всех произведенных опытов: электрическое сопротивление нагревательного элемента плитки r , потребляемую мощность P , количество тепла Q_1 , выделившееся в электроплитке и полученное жидкостью Q_2 , а также к. п. д. установки η .

2. Результаты наблюдений и расчетов свести в одну общую таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений					Результаты вычислений				
	$U, в$	$I, а$	$t, сек.$	$\vartheta_2, град.$	$W, кВт-ч$	$r, ом$	$P, вт$	$Q_1, кал$	$Q_2, кал$	η
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

3. Построить графики $\eta = f(t)$ и $\eta = f(\vartheta_2)$, найти из них наибольшее значение к. п. д. установки η_m , указав, какой температуре воды ϑ_2 оно соответствует.

4. Начертить кривую нагрева $\vartheta_2 = f(t)$ электронагревательного прибора, по которой определить постоянную времени нагрева T_n .

5. Подсчитать стоимость кипячения одного литра воды при отпуском тарифе на электроэнергию $s_0 = 40 \text{ коп/квт-ч}$.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 22—23, 26—28.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 53—59, 637—638, 642—649.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 42—44, 550—561, 571—574.

Работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАРЯДКЕ И РАЗРЯДКЕ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы

1. Экспериментальным и теоретическим путем установить изменение тока и напряжения на емкости по времени при включении незаряженного конденсатора с реальным диэлектриком на постоянное напряжение.

2. Выяснить законы изменения тока и напряжения на емкости при замыкании заряженного конденсатора на сопротивление.

3. Определить постоянные времени цепи при зарядке и разрядке конденсатора.

4. Найти величину сопротивления диэлектрика емкости.

Основные теоретические положения

При включении незаряженного конденсатора с идеальным диэлектриком, т. е. таким, сопротивление которого можно считать $r_{из} = \infty$ к источнику постоянного тока по соединительным проводам потечет зарядный ток в направлении от обкладки, соединенной с отрицательным полюсом, к обкладке, соединенной с положительным полюсом.

В результате этого на одной обкладке конденсатора будут накапливаться положительные заряды, а на другой — отрицательные. Через определенный промежуток времени между обкладками установится электрическое поле, и диэлектрик окажется поляризованным, процесс зарядки окончится и абсолютное зна-

чение напряжения на обкладках конденсатора сравнивается с величиной напряжения источника постоянного тока.

Длительность этого переходного процесса t_0 зависит от величины произведения емкости конденсатора на сопротивление, через которое конденсатор присоединяется к источнику электрической энергии, т. е. от

$$T = rC, \text{ сек.}, \quad (1)$$

где r — сопротивление, ом ;

C — емкость конденсатора, ϕ .

Эту величину T называют постоянной времени цепи.

Практически длительность переходного процесса может быть найдена как

$$t_0 = (3 \div 5) T. \quad (2)$$

Явления, происходящие при зарядке конденсатора с реальным диэлектриком, несколько отличаются от рассмотренного выше процесса.

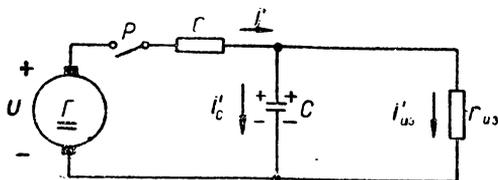


Рис. 35. Зарядка конденсатора с реальным диэлектриком через сопротивление r от источника постоянного тока.

Это объясняется тем, что в таких конденсаторах применяются несовершенные диэлектрики, обладающие хотя малой, но все же конечной проводимостью.

При исследовании переходных процессов в электрических цепях эти конденсаторы обычно заменяют эквивалентной схемой, состоящей из конденсатора емкостью C с идеальным диэлектриком и сопротивления $r_{из}$, которые соединены между собой параллельно (рис. 35).

В этом случае из-за несовершенства изоляции диэлектрического слоя конденсатора ток от источника электрической энергии i' может быть представлен суммой зарядного тока i'_c и тока утечки $i'_{из}$, т. е.

$$i' = i'_c + i'_{из}. \quad (3)$$

Так как

$$i'_c = C \frac{du'_c}{dt} \quad (4)$$

и

$$i'_{из} = \frac{u'_c}{r_{из}}, \quad (5)$$

где u'_c — переменное напряжение на обкладках при зарядке конденсатора,

то уравнение (3) можно представить в следующем виде:

$$i' = C \frac{du'_c}{dt} + \frac{u'_c}{r_{из}}. \quad (6)$$

Напряжение источника электрической энергии

$$U = i'r + u'_c = \left(C \frac{du'_c}{dt} + \frac{u'_c}{r_{из}} \right) r + u'_c = rC \frac{du'_c}{dt} + u'_c \frac{r + r_{из}}{r_{из}} \quad (7)$$

или

$$U \frac{r_{из}}{r + r_{из}} + u'_c = \frac{r r_{из}}{r + r_{из}} \cdot C \frac{du'_c}{dt}. \quad (8)$$

Обозначив

$$\frac{r r_{из}}{r + r_{из}} C = T' \quad (9)$$

и отделив переменные, получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dt}{T'} = \frac{du'_c}{U \frac{r_{из}}{r + r_{из}} - u'_c}, \quad (10)$$

проинтегрировав которое, находим закон изменения напряжения на обкладках конденсатора при зарядке с течением времени

$$u'_c = U \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}} \right) \frac{r_{из}}{r + r_{из}}. \quad (11)$$

Проанализировав выражение (11), видим, что в конденсаторе с реальным диэлектриком установившееся значение напряжения U'_c не равно напряжению источника постоянного тока U и составляет

$$U'_c = U \frac{r_{из}}{r + r_{из}}, \quad (12)$$

т. е. определяется условиями последовательной цепи постоянного тока.

Подставив найденное значение u'_c из уравнения (11) в уравнение (6) после ряда преобразований получим закон изменения общего тока при зарядке конденсатора

$$i' = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{T'}} + \frac{U}{r + r_{из}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'}} \right). \quad (13)$$

Из соотношения (13) видно, что в момент включения наблюдается бросок тока

$$i'_0 = \frac{U}{r}, \quad (14)$$

а затем ток начнет постепенно уменьшаться и его установившееся значение не будет равно нулю, как это имеет место в конденсаторах с совершенным диэлектриком, а определится величиной тока утечки через изоляцию

$$I'_{\text{из}} = \frac{U}{r + r_{\text{из}}}. \quad (15)$$

Если бы исследуемый конденсатор имел совершенный диэлектрик, то после его отсоединения от источника электрической энергии установившееся электрическое поле существовало бы бесконечно долго.

В конденсаторе с реальным диэлектриком вследствие небольшой проводимости диэлектрика с течением времени будет происходить саморазряд конденсатора через всю среду, разделяющую его обкладки.

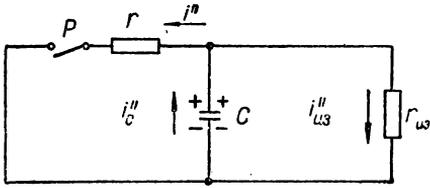


Рис. 36. Разряд заряженного конденсатора на сопротивление r .

В результате этого напряжения на обкладках конденсатора будет уменьшаться и спустя некоторый промежуток времени конденса-

тор полностью разрядится.

Время, в течение которого произойдет саморазряд конденсатора, зависит от качества изоляции материала, находящегося между его обкладками.

Чем лучше диэлектрическая среда, чем выше ее изолирующие свойства, тем длительнее конденсатор будет держать приобретенный им заряд.

Если же заряженный конденсатор специально замкнуть на какое-нибудь сопротивление r , то он, являясь источником электрической энергии, станет за счет запаса энергии электрического поля питать подключенную нагрузку, эквивалентное сопротивление которой, как видно из рис. 36, будет

$$r'' = \frac{r r_{\text{из}}}{r + r_{\text{из}}}. \quad (16)$$

Как видно из рис. 36, направление общего тока i_c'' и разрядного i'' не совпадают со своими направлениями при зарядке (см. рис. 35), в то время как направление тока утечки $i''_{\text{из}}$ через изоляцию остается прежним.

Закон изменения общего тока i_c'' при разрядке может быть найден в результате интегрирования линейного дифференциального уравнения

$$\frac{u_c''}{r''} = -C \frac{du_c''}{dt}, \quad (17)$$

проинтегрировав которое, получим

$$u_c'' = U_c e^{-\frac{t}{T''}}. \quad (18)$$

Тогда ток разряда будет

$$i'' = \frac{U_c}{r} e^{-\frac{t}{T''}}, \quad (19)$$

где

$$T'' = r''C, \quad (20)$$

является постоянной времени цепи при разряде конденсатора на эквивалентное сопротивление r'' .

Из выражения (19) видно, что разряд конденсатора начинается броском тока

$$i_0'' = \frac{U_c}{r}, \quad (21)$$

который затем уменьшается и достигает нулевого значения.

Сопоставив выражения (9), (16) и (20), приходим к заключению, что постоянная времени цепи при зарядке T' и разрядке T'' конденсатора C реальным диэлектриком остается величиной неизменной.

Экспериментальное нахождение T' и T'' и сравнение их между собой показывает, что они несколько отличаются друг от друга.

Это отклонение, как и некоторые небольшие отступления экспериментально полученных кривых при зарядке и разрядке конденсатора от теоретических, могут быть объяснены неоднородностями в изолирующем веществе, и, в особенности, различной местной проводимостью в диэлектрическом слое технических конденсаторов.

Описание схемы установки

Для проведения опыта собрать установку (рис. 37), состоящую из двухполюсного рубильника P_1 , плавких предохранителей Π_1 , вольтметра V и микроамперметра μA , измеряющего ток при зарядке и разрядке конденсатора C , соединенного последовательно с сопротивлением r , а также двухполюсного переключателя Π , обеспечивающего в положении $1-1'$ зарядку, а в положении $2-2'$ разрядку конденсатора.

Питание установки производится от сети постоянного тока.

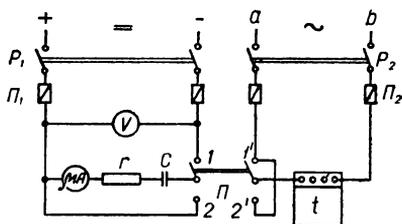


Рис. 37. Схема исследования процессов при зарядке и разрядке конденсатора.

Электроизмерительные приборы следует выбирать магнито-электрической системы, причем микроамперметр должен быть взят с нулем посредине шкалы, так как направление отклонения его стрелки будет различным при зарядке и разрядке конденсатора, или выбран детекторной системы.

Время протекания переходных процессов регистрируется электрическим секундомером t , который питается через двухполюсный рубильник P_2 и предохранители Π_2 от сети переменного тока и включается двухполюсным переключателем Π , когда последним включают конденсатор на зарядку или разрядку.

Для возвращения стрелок электрического секундомера после его отключения в исходное положение необходимо нажать на кнопку возврата, расположенную на правой боковой стороне его корпуса.

Проведение опыта

1. Собрать последовательную часть цепи постоянного тока, присоединить вольтметр V , а затем приступить к сборке цепи переменного тока с электрическим секундомером t .

2. Поставить двухполюсный переключатель Π в положение 2—2', вернуть стрелки секундомера в исходное положение, и после проверки схемы руководителем, включить двухполюсные рубильники P_1 и P_2 .

3. Включить переключателем Π конденсатор C на зарядку (положение 1—1') и через каждые 3 сек. записывать ток при зарядке i' по микроамперметру до тех пор, пока он не примет установившегося значения $I_{из}'$, являющегося током утечки через изолятор.

Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Время t , сек.	Ток при зарядке i'		Примечания
		в делениях шкалы микроамперметра	в $\mu\text{ка}$	
1				Напряжение $U =$ в
2				Сопротивление $r =$ ом
3				Емкость $C =$ мкф
4				Цена деления микроамперметра $1^\circ =$ мка
5				
6				
7				
8				
9				
10				

4. По окончании процесса зарядки разомкнуть двухполюсный переключатель Π , вернуть стрелки секундомера в исходное положение, а затем замкнуть переключатель Π так, чтобы заряженный конденсатор C разряжался на внешнее сопротивление r и сопротивление изоляции $r_{из}$ (положение 2—2'), при этом через каждые 3 сек. отмечать ток разрядки i'' по микроамперметру до тех пор, пока он не станет меньше 5% своего первоначального значения i''_0 .

Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Время t , сек.	Ток при разрядке i''	
		в делениях шкалы микроамперметра	в $\mu\text{ка}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

5. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опыта, с приведением всех ее технических характеристик.

Обработка результатов испытания

1. По данным опыта построить кривую зависимости тока при зарядке от времени, т. е. $i' = f(t)$, найти по ней ток утечки через изоляцию $I_{из}'$, вычислить сопротивление изоляции конденсатора $r_{из}$ и определить постоянную времени цепи T' при зарядке.

2. Пользуясь выражениями (11) и (12), рассчитать и построить кривую, показывающую изменение напряжения на обкладках конденсатора при зарядке в зависимости от времени, т. е. $u_c' = f(t)$, а также установить конечное значение напряжения на конденсаторе U_c' .

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Время t , сек.	$e^{-\frac{t}{T'}}$	$1 - e^{-\frac{t}{T'}}$	Напряжение на конденсаторе при зарядке $U_c, \text{ в}$	Примечание
1					Напряжение $U = \text{в}$
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

3. По данным опыта разрядки конденсатора на сопротивление r'' построить кривую $i'' = f(t)$ и определить по ней графическим путем постоянную времени цепи T'' при разрядке.

4. Пользуясь выражениями (20) и (16), найти сопротивление изоляции конденсатора $r_{\text{из}}$ и сравнить его со значением, найденным при опыте зарядки конденсатора.

Объяснить причины расхождения найденных различными путями значений $r_{\text{из}}$.

5. Применив формулу (18), рассчитать и построить кривую изменения напряжения на обкладках конденсатора в зависимости от времени при разрядке, т. е. $u_c'' = f(t)$.

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Время t , сек.	$e^{-\frac{t}{T''}}$	Напряжение на конденсаторе при разрядке $u_c'', \text{ в}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 68—70, 71—73.
Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 94—99, 103—107.
Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 90—99.

Работа № 5

ИСПЫТАНИЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Цель работы

1. Изучить баллистический метод измерения величины магнитного потока.
2. Ознакомиться с устройством и работой флюксметра.
3. Опытным путем найти величины магнитной индукции в различных сечениях постоянного магнита.

Основные теоретические положения

Измерительным прибором при использовании данного метода является так называемый баллистический гальванометр, который отличается от обычного тем, что подвижная часть его выполняется с увеличенным моментом инерции.

При прохождении по обмотке баллистического гальванометра кратковременного тока подвижная часть его практически начинает двигаться после прекращения прохождения тока, а затем через некоторый промежуток времени она возвращается в свое исходное положение.

Как показывают теоретические исследования, наибольшая величина отклонения подвижной части гальванометра α_m от нулевого положения, называемая баллистическим отбросом, пропорциональна количеству протекшего через него электричества q , т. е.

$$q = c_s \alpha_m, \quad (1)$$

где c_s — баллистическая постоянная гальванометра, представляющая собой количество электричества, протекшего по его обмотке и вызвавшее отклонение подвижной части на одно деление шкалы.

Если баллистический гальванометр соединить с катушкой, имеющей w витков, которая сцеплена с некоторым магнитным потоком, то при всяком его изменении в ней будет наводиться электродвижущая сила индукции

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Эта э. д. с., в свою очередь, в результате возникшего тока i уравновесится падением напряжения в данной цепи и наводимой в ней электродвижущей силой самоиндукции, т. е.

$$e = i(r_r + r_k) + L \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

где r_r — сопротивление баллистического гальванометра;
 r_k — сопротивление присоединенной к нему катушки;
 L — индуктивность цепи, образованной баллистическим гальванометром и измерительной катушкой;
 $\frac{di}{dt}$ — скорость изменения тока.

Сопоставив уравнения (2) и (3), получим

$$i(r_r + r_k) + L \frac{di}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Интегрируя его в пределах от $t=0$ до $t=T$ и принимая во внимание, что интеграл второго члена левой части равен нулю, получим

$$(r_r + r_k) \int_0^T i dt = -w \int_0^T d\Phi, \quad (5)$$

или

$$(r_r + r_k) q = -w \Delta\Phi, \quad (6)$$

где q — количество электричества, протекшее через баллистический гальванометр;

$\Delta\Phi$ — изменение величины магнитного потока, сцепленного с измерительной катушкой.

Абсолютное значение изменения магнитного потока $\Delta\Phi$ определится из уравнения (6) как

$$\Delta\Phi = \frac{q(r_r + r_k)}{w} \quad (7)$$

или, принимая во внимание, уравнение (1), получим

$$\Delta\Phi = \frac{c_b \alpha_m (r_r + r_k)}{w}, \quad (8)$$

где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного потока, вб;

c_b — баллистическая постоянная, к/деление;

α_m — число делений шкалы при баллистическом отбросе;

r_r и r_k — сопротивления соответственно гальванометра и измерительной катушки, ом;

w — число витков измерительной катушки.

Для определенного гальванометра и неизменного сопротивления цепи, на которую он замкнут, выражение (8) можно упростить, если ввести вместо баллистической постоянной c_g вольт-секундную постоянную гальванометра

$$c_g' = c_g(r_g + r_k), \quad (9)$$

тогда уравнение (8) примет вид

$$\Delta\Phi = \frac{c_g' \alpha_m}{w}. \quad (10)$$

Как видно из уравнения (10), всякое изменение магнитного потока $\Delta\Phi$, сцепленного с измерительной катушкой, вызывает соответствующий отброс баллистического гальванометра α_m .

Это дает возможность, располагая в различных сечениях постоянного магнита измерительную катушку и быстро сбрасывая ее, находить интересующий нас поток, а следовательно, и величину магнитной индукции в тех же местах

$$B = \frac{\Delta\Phi}{S}, \quad (11)$$

где B — магнитная индукция в исследуемом сечении постоянного магнита, $вб/м^2$;

S — площадь сечения полюса постоянного магнита, $м^2$.

Величину магнитного потока можно измерить также при помощи специального прибора — флюксметра, который представляет собой переносный прибор со шкалой, градуированной непосредственно в единицах измерения магнитного потока.

Этот прибор (рис. 38) является гальванометром магнитоэлектрической системы с подвижной катушкой 7, находящейся в поле постоянного магнита 6, но с практически нулевым противодействующим моментом, так что стрелка флюксметра может находиться в любой точке шкалы.

К зажимам флюксметра присоединяется измерительная катушка 2, в которой при сдвигании с постоянного магнита наводится э. д. с., вызывающая отброс подвижной части.

$$\alpha_m = \kappa \Delta\Phi. \quad (12)$$

Как видно из уравнения (12), величина угла поворота подвижной системы флюксметра пропорциональна изменению магнитного потока, пронизывающего контур измерительной катушки флюксметра.

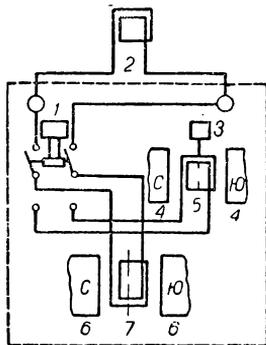


Рис. 38. Схема устройства флюксметра.

Так как стрелка флюксметра может находиться в любом промежуточном положении, то нулевая отметка на шкале является чисто условной.

Для установки стрелки в нулевое положение рукояткой 1 ставят переключатель в нижнее положение (позиция «корректор») и поворотом ручки 3, скрепленной с вспомогательной поворотной катушкой 5, находящейся в поле постоянного магнита 4, достигают необходимого поворота стрелки флюксметра.

После этого ручкой 1 переводят переключатель в верхнее положение (позиция «измерение») и, перемещая измерительную катушку в исследуемом магнитном поле, получают отклонение стрелки флюксметра, отвечающее величине изменения магнитного потока, которое соответствует вызванному перемещению.

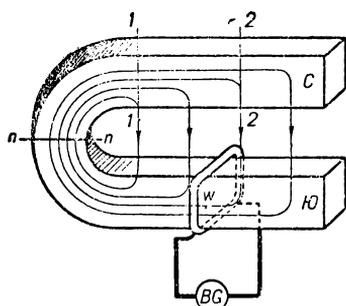


Рис. 39. Схема измерения магнитного потока постоянного магнита.

Описание схемы установки

Экспериментальная установка (рис. 39) состоит из исследуемого постоянного подковообразного магнита, измерительной катушки, надеваемой на различные сечения полюса (1—1, 2—2 и т. д.), и баллистического гальванометра *BG* (или флюксметра), который подключается к концам измерительной катушки *w*.

Проведение опыта

1. Нанести на постоянном магните среднюю линию и наметить на ней 4—6 равноотстоящих точек, считая от нейтральной линии *n—n*.
2. Измерить линейкой расстояние между намеченными точками и результаты измерений внести в таблицу.

№ сечений	Расстояние между сечениями $\Delta l, \text{см}$
<i>n—n</i>	_____
1—1	_____
2—2	_____
3—3	_____
4—4	_____

3. Присоединить концы измерительной катушки к зажимам баллистического гальванометра (или флюксметра) и, располагая ее поочередно на всех намеченных сечениях ($n - n$, $1 - 1$, $2 - 2$ и т. д.), быстро сдергивать с магнита, наблюдая при этом по гальванометру величину баллистического отброса (или делая отсчет по флюксметру).

Примечание. Для удобства пользования флюксметром желательно каждый раз после установки измерительной катушки на определенном сечении постоянного подковообразного магнита возвращать корректором стрелку прибора на нуль шкалы.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ сечений	Отсчет по шкале измерительного прибора a_m , делений	Примечания
$n - n$		Баллистическая постоянная $c_b = \frac{\kappa}{\text{деление}}$
$1 - 1$		Сопротивление гальванометра $r_r = \text{ом}$
$2 - 2$		Сопротивление измерительной катушки $r_k = \text{ом}$
$3 - 3$		Число витков измерительной катушки $w =$
$4 - 4$		Сечение полюса постоянного магнита $S = \text{м}^2$
		Цена деления флюксметра 1 деление = вб

4. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании постоянного подковообразного магнита.

Обработка результатов испытания

1. Определить вольтсекундную постоянную c_b' баллистического гальванометра.

2. Рассчитать величину изменения магнитного потока $\Delta\Phi$ при сборе измерительной катушки с различных сечений полюса постоянного магнита, а также величину магнитной индукции B в них.

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ сечений	Изменение магнитного потока $\Delta\Phi$, вб	Магнитная индукция B , вб/м ²
$n - n$		
1—1		
2—2		
3—3		
4—4		

3. Вычертить кривую изменения магнитной индукции в различных сечениях постоянного магнита по длине средней магнитной линии, т. е. $B = f(l)$.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 43—44, 51—53, 55—58.
 Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 116-118, 130—137.
 Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 44—47, 63—66.

Работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫКЛЮЧЕНИИ ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы

1. Опытным путем определить величины амплитуды перенапряжения при выключении индуктивных цепей.
2. Установить зависимость амплитуды перенапряжения на индуктивной катушке от величины присоединенного разрядного сопротивления.

Основные теоретические положения

Постоянный электрический ток i , протекающий по проводнику, создает в нем и в окружающей его среде особое напряженное состояние, называемое магнитным полем.

В последнем сосредоточена энергия, которая определяется формулой

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (1)$$

где W_m — величина магнитной энергии, *вт-сек*;

L — коэффициент индуктивности проводника, *гн*;

i — величина протекающего тока, *а*.

При установившемся режиме, когда ток не изменяет своего значения, связанное с ним магнитное поле остается неизменным и величина W_m является постоянной.

Если по какой-либо причине в проводнике начнет изменяться ток i , то соответственно начнет увеличиваться или уменьшаться магнитное поле.

В результате этого в проводнике будет наводиться э. д. с. сила самоиндукции

$$e_s = -L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

где $\frac{di}{dt}$ — скорость изменения тока.

Знак минус в правой части уравнения (2) подчеркивает то обстоятельство, что при увеличении тока, когда $\frac{di}{dt} > 0$, возникающая э. д. с. самоиндукции e_s направлена противоположно току i , а при уменьшении его, когда $\frac{di}{dt} < 0$, она совпадает с его направлением, стремясь каждый раз воспрепятствовать изменению магнитного поля (правило Э. Х. Ленца).

Таким образом, э. д. с. самоиндукции, возникающая в цепях постоянного тока при всевозможных изменениях режима, оказывает противодействие новому устанавливаемому режиму, в результате чего ток изменяется не скачкообразно, а доходит до своего нового установившегося значения постепенно при одновременном изменении связанного с ним магнитного поля.

Как видно из выражения (2), возникающая э. д. с. самоиндукции может достигь значительных величин в тех случаях, когда в электрической цепи происходит быстрое изменение тока по времени.

Практически это наблюдается при выключении любой катушки, обладающей большим коэффициентом L , когда внезапно прерывается ток.

Освобождающаяся при этом энергия магнитного поля вызывает появление такой э. д. с. самоиндукции, которая обычно в несколько раз превышает то напряжение U , под которым катушка находилась до выключения.

Эта э. д. с. самоиндукции, называемая перенапряжением, может представлять определенную опасность для целостности изоляции проводников катушки и вызвать ее пробой.

Определение численного значения амплитуды возникающего перенапряжения U_m при выключении индукционной катушки является очень сложной задачей, так как величина изменяемого переходного сопротивления контактов выключающего устройства и возникающей при этом электрической дуги не поддаются математической обработке и надежные данные может дать исключительно опыт.

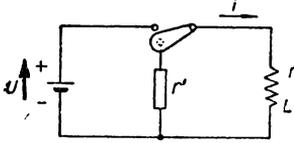


Рис. 40. Схема замыкания индукционной катушки при выключении на разрядное сопротивление r' .

Для ограничения величины возникающих перенапряжений полезно перед отключением индукционной катушки от источника питания замыкать ее на некоторое разрядное сопротивление r' (рис. 40).

В этом случае цепь катушки после отключения не прерывается и исчезающим магнитным полем в образовавшемся замкнутом контуре некоторое время поддерживается э. д. с. самоиндукции e_s , обуславливающая затухающий ток i в цепи.

Закон изменения этого тока в цепи катушки, замкнутой на разрядное сопротивление r' , можно найти из соотношения

$$-L \frac{di}{dt} = i(r + r'), \quad (3)$$

которое приводится к линейному дифференциальному уравнению первого порядка

$$\frac{di}{i} = -\frac{r + r'}{L} dt. \quad (4)$$

Проинтегрировав это уравнение, после несложных преобразований найдем уравнение тока в замкнутом контуре

$$i = I e^{-\frac{t}{T}}, \quad (5)$$

где I — ток установившегося режима;

T — постоянная времени контура.

Эти величины могут быть найдены из соотношений

$$I = \frac{U}{r} \quad (6)$$

и

$$T = \frac{L}{r + r'}. \quad (7)$$

Из уравнения (5) видно, что ток с течением времени убывает по экспоненциальной кривой и практически прекращается после выключения через время

$$t_0 = (3 \div 5) T. \quad (8)$$

Следовательно, длительность переходного процесса зависит от величины разрядного сопротивления r' и чем оно меньше, тем этот процесс дольше, а возникающие перенапряжения при выключении меньше.

Подставив в уравнение (2) значение тока из выражения (3), найдем закон изменения величины э. д. с. самоиндукции при выключении

$$e_s = I(r + r')e^{-\frac{t}{T}}. \quad (9)$$

Наибольшее значение эта величина имеет в момент размыкания цепи, когда $t = 0$.

Следовательно, амплитуда перенапряжения будет

$$e_{sm} = U_m = I(r + r'). \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), величина амплитудного перенапряжения U_m зависит от величины разрядного сопротивления r' . Чем меньше значение имеет разрядное сопротивление r' , тем меньшая амплитуда перенапряжения U_m возникает на катушке.

Наименьшее перенапряжение на индукционной катушке при отклонении ее от источника питания будет тогда, когда она будет замкнута накоротко на свое собственное сопротивление r .

В этом случае амплитуда перенапряжения будет равна произведению Ir , т. е. тому напряжению U , под которым катушка находится при установившемся режиме.

При отсутствии разрядного сопротивления, когда $r' = \infty$, величина U_m не достигнет бесконечно большого значения, как это следует из формулы (10), так как между размыкающимися контактами всегда при выключении возникает искра или дуга, на поддержание которой расходуется энергия, накопленная в магнитном поле катушки, в результате чего амплитуда перенапряжения U_m значительно снижается.

Описание схемы установки

Для проведения опыта собрать установку, состоящую из источника питания — аккумуляторной батареи A_k с вольтметром V , измеряющим ее напряжение, автоматического электромагнитного прерывателя — зуммера Z , исследуемой катушки со стальным сердечником K , переменного разрядного сопротивления r' и измерительного устройства, состоящего из полупроводникового выпрямителя B , конденсатора C и вольтметра V_m для измерения величины амплитуды перенапряжения на катушке (рис. 41).

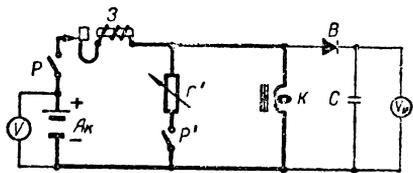


Рис. 41. Схема измерения перенапряжения при выключении индуктивности.

Зуммер производит непрерывно повторяющийся процесс выключения катушки из-за чего под действием возникающей э. д. с. самоиндукции в измерительную схему через выпрямитель B будет проходить ток и конденсатор C будет заряжаться.

При включениях катушки ток по измерительной схеме от заряженного конденсатора не пойдет во внешнюю цепь вследствие односторонней проводимости полупроводникового выпрямителя и конденсатор C разрядиться не сможет.

Так как процесс включения и выключения повторяется непрерывно, то заряд конденсатора будет возрастать до тех пор, пока его напряжение не достигнет величины амплитуды перенапряжения на катушке K .

Последнюю измеряют вольтметром V_m магнитоэлектрической системы с очень большим внутренним сопротивлением во избежание значительного разряда конденсатора на его обмотку, что может привести к заметной погрешности измерения.

Проведение опыта

1. Сборку схемы производить в следующей последовательности: к аккумуляторной батарее A_k через однополюсный рубильник P и зуммер Z присоединить катушку K и переменное разрядное сопротивление r' , а также приключить вольтметр V_m .

Отдельно собрать измерительную схему, состоящую из выпрямителя B , конденсатора C и вольтметра V_m , которую присоединить к основной собранной схеме.

2. После проверки схемы руководителем включить рубильник P' и замкнуть рубильник P .

Затем регулировочным винтом зуммера Z отрегулировать определенную устойчивую частоту колебаний якоря и отсчитать по вольтметру V_m величину перенапряжения на катушке при ее выключении.

3. Аналогичные измерения проделать при замкнутом рубильнике P' , т. е. при различных значениях включенного разрядного сопротивления r' , изменяя его величину от наибольшего значения до значения, близкого к нулю.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение аккумуляторной батареи $U, в$	Величина перенапряжения на катушке $U_m, в$	Величина разрядного сопротивления $r', ом$
1			∞
2			
3			
4			
5			
6			
7			

4. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опытов, и привести ее технические данные.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех произведенных опытов отношение величины амплитуды перенапряжения на катушке при выключении U_m к напряжению установившегося режима U .

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	$U, в$	$U_m, в$	$\kappa = \frac{U_m}{U}$	$r', ом$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

2. Составить в одной координатной системе графики: $U_m = f(r')$, $U = f(r')$, $\kappa = f(r')$.

3. Изложить соображения о влиянии величины разрядного сопротивления на амплитуду перенапряжения на индуктивной катушке при ее выключении.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 58—60, 63—65.
Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 138—143, 152—156.
Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 68—71, 73—74, 77—83.

РАЗДЕЛ 2

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Работа № 7

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОДНОФАЗНЫМ ТОКОМ

Цель работы

1. Определить величины потерь напряжения, мощности и коэффициента полезного действия электрической линии однофазного тока в зависимости от нагрузки.
2. Измерить коэффициент мощности установки.
3. Составить векторную диаграмму напряжений и токов, по ней определить величины потери и падения напряжения, а также вычислить параметры исследуемой линии.

Основные теоретические положения

При передаче электрической энергии однофазным током на расстояние необходимо учитывать не только активное сопротивление проводов r_d , но и индуктивное их сопротивление x_d .

Последнее обусловлено наличием переменного магнитного поля вокруг проводов линии, когда по ним протекает переменный ток I .

Особенно проявляется оно при проводах, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, и дает малый эффект в случае их близкого расположения.

Поэтому индуктивное сопротивление учитывается только в воздушных линиях, где расстояние между проводами бывает от 0,4 м (электроустановки напряжением до 1000 в) и доходит до 7,5 м (электроустановки напряжением свыше чем 1000 в).

В кабельных линиях, где токоведущие жилы находятся на очень малом расстоянии друг от друга, а также в линиях, выпол-

ненных изолированными проводами, проложенными в газовых трубах, индуктивное сопротивление настолько мало, что практически его можно не учитывать.

Наличие активного r_n и индуктивного x_n сопротивлений воздушной линии однофазного тока приводит к тому, что напряжение у электроприемников U_2 будет иным, чем в начале линии U_1 .

Алгебраическая разность векторов напряжений в начале и конце линии

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (1)$$

называется потерей напряжения, а геометрическая разность тех же величин

$$\overline{\Delta U} = \overline{U_1} - \overline{U_2} \quad (2)$$

носит название падения напряжения в линии.

Так как для нормальной работы электроприемников, находящихся в конце линии, интерес представляет только величина напряжения, а не ее фаза, то при расчетах электрических сетей однофазного тока обычно определяют величину потери напряжения ΔU , а не падение напряжения ΔU .

На рис. 42 представлена векторная диаграмма линии однофазного тока, несущей индуктивную нагрузку с коэффициентом мощности электроприемников $\cos \varphi_2$.

Из диаграммы видно различие между величиной падения напряжения в линии $\overline{\Delta U}$ и потерей напряжения, изображенной отрезком ΔU .

Величины углов φ , φ_1 , φ_2 зависят от параметров линии, всей установки и нагрузки и могут быть найдены из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{x_i}{r_i}, \quad (3)$$

где r_i и x_i — активное и реактивное сопротивления соответствующих участков цепи (линии, всей установки, нагрузки).

В практических расчетах часто вместо отрезка ΔU , определяемого разностью показаний вольтметров, включенных в начале и конце линии, берут другой весьма близкий к нему отрезок Δu (см. рис. 42).

Как показывает анализ, при этом происходит ошибка около 3—5%, что для технических расчетов существенного значения не имеет.

Такая замена позволяет установить зависимость между ΔU , r_n , x_n и $\cos \varphi_2$ в виде соотношения

$$\Delta U \cong I(r_n \cos \varphi_2 + x_n \sin \varphi_2). \quad (4)$$

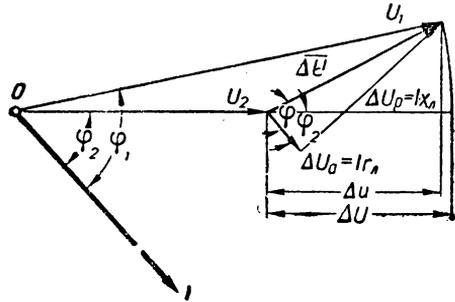


Рис. 42. Векторная диаграмма линии однофазного тока, несущей индуктивную нагрузку с коэффициентом мощности $\cos \varphi_2$.

При расчете электрических сетей однофазного тока формулу (4) можно записать в следующем виде:

$$\Delta U = 2Il(r \cos \varphi_2 + x \sin \varphi_2), \quad (5)$$

где r — активное сопротивление провода длиной в 1 км, ом;
 x — индуктивное сопротивление провода длиной в 1 км, ом;
 l — длина линии, км;
 I — ток, а.

Выражение, стоящее в скобках, называют расчетным сопротивлением линии

$$\xi = r \cos \varphi_2 + x \sin \varphi_2. \quad (6)$$

Так как значительное снижение напряжения расстраивает работу электроприемников (ламп накаливания, электрических печей, электродвигателей и т. п.), то согласно существующим правилам устройства электроустановок промышленных предприятий, электрические линии должны проектироваться так, чтобы при нормальной их работе потеря напряжения в них не превышала 2,5—5% в зависимости от типа нагрузки.

Активное сопротивление линии приводит к нагреванию проводов, на что затрачивается мощность

$$\Delta P = P_1 - P_2, \quad (7)$$

где P_1 и P_2 — мощность, соответственно потребляемая в начале линии и электроприемниками, измеряемая ваттметрами, один из которых включен в начале линии, а другой в конце ее.

Мощность электроприемников

$$P_2 = U_2 I \cos \varphi_2 \quad (8)$$

при активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$) представится как

$$P_2 = U_2 I, \quad (9)$$

где U_2 — показание вольтметра, включенного в конце линии;
 I — ток, потребляемый нагрузкой.

Таким образом, потребители получают не всю активную мощность, поступившую в линии, а только часть ее

$$P_2 = P_1 - \Delta P. \quad (10)$$

На основании вышеизложенного определим к. п. д. линии однофазного тока

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (11)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ всей установки может быть вычислен по показаниям электроизмерительных приборов, включенных в начале линии, из соотношения

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I}. \quad (12)$$

Для полной характеристики работы линии однофазного тока при переменной нагрузке обычно рассматривают следующие графические зависимости: $U_2 = F(P_2)$, $I = F(P_2)$, $\Delta U = F(P_2)$, $\Delta P = F(P_2)$, $\eta = F(P_2)$, $\cos \varphi_1 = F(P_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$, которые получаются в результате опытного исследования.

Описание схемы установки

В экспериментальной установке (рис. 43) исследуемая линия заменяется двумя катушками $\frac{Z_n}{2}$, включенными последовательно в оба провода, питающих нагрузку r_n .

Регулирующим реостатом r_p , включенным в начале исследуемой линии, поддерживают неизменное напряжение U_1 , которое измеряют вольтметром V_1 .

Частотомером H_z измеряют частоту f переменного тока, а ваттметром W активную мощность P_1 , потребляемую установкой.

Приборы, включенные в конце линии — вольтметр V_2 и амперметр A , показывают напряжение в конце линии и ток нагрузки.

Питание установки производится от сети однофазного тока $a-b$ через двухполюсный рубильник P и плавкие предохранители Π .

Для получения наиболее достоверных результатов измерения все приборы желательно брать электродинамической системы, обеспечивающей наибольшую точность при измерениях на переменном токе.

Проведение опыта

1. Собрать последовательную часть схемы, после чего присоединить параллельную обмотку ваттметра, частотомер и оба вольтметра.

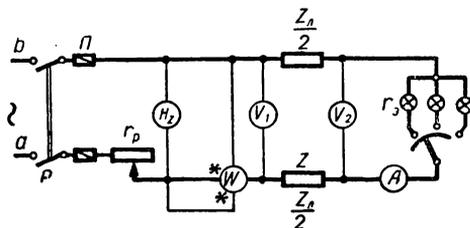


Рис. 43. Схема исследования линии передачи электрической энергии однофазным током при постоянном подводимом напряжении.

2. После проверки схемы руководителем замкнуть двухполюсный рубильник P , включить переключателем лампового реостата все лампы, установить регулировочным реостатом r_p напряжение в начале линии U_1 , заданное руководителем, и записать показания всех приборов.

3. Выключить одну лампу в ламповом реостате, отрегулировать напряжение в начале линии U_1 до прежнего значения и снова записать показания всех приборов.

4. В дальнейшем, выключая все время по одной лампе, записывать показания приборов и свести нагрузку к нулю.

Примечание. При всех опытах напряжение в начале линии должно поддерживаться неизменным.

5. Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение, v		Частота f , $гц$	Подводимая мощность P_1 , $вт$	Ток нагрузки I , a	Число включенных ламп n , шт.
	в начале линии U_1	в конце линии U_2				
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опыта, с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Пользуясь данными наблюдений, определить для всех произведенных опытов потерю напряжения ΔU , мощность электроприемников P_2 , потерю мощности в линии ΔP , коэффициент полезного действия линии η , коэффициент мощности установки $\cos \varphi_1$.

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений				Результаты вычислений				
	$U_1, \text{в}$	$U_2, \text{в}$	$I, \text{а}$	$P_1, \text{вт}$	$\Delta U, \text{в}$	$P_2, \text{вт}$	$\Delta P, \text{вт}$	η	$\cos \varphi_1$
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

2. Построить в одной координатной системе кривые: $U_2 = F(P_2)$, $I = F(P_2)$, $\Delta U = F(P_2)$, $\Delta P = F(P_2)$, $\eta = F(P_2)$, $\cos \varphi_1 = F(P_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = 1$ и найти из них значения всех перечисленных величин при 75% наибольшего тока, который был при опытах.

3. Подсчитать наибольшую потерю напряжения в линии и сравнить ее с нормами.

4. Вычертить в масштабе для случая наибольшей нагрузки векторную диаграмму напряжений и тока линии, несущей в конце активную нагрузку, используя для построения только величины U_1 , U_2 и $\cos \varphi_1$.

5. Из построенной векторной диаграммы определить падение напряжения ΔU , потерю напряжения ΔU , а также активную ΔU_a и индуктивную ΔU_p составляющие падения напряжения в линии и ее параметры r_n и x_n , используя выражения:

$$r_n = \frac{\Delta U_a}{I} \quad (13)$$

и

$$x_n = \frac{\Delta U_p}{I} \quad (14)$$

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 83—84; 156—159; 166, 349—351.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 174—179, 301—305, 322, 326—327, 715—716, 719—721.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 141—147, 241—242, 250—252, 607—612.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Построить векторные диаграммы напряжений и тока при различных видах нагрузки в последовательной цепи однофазного тока.

2. Определить параметры отдельных электроприемников последовательной цепи однофазного тока, а также коэффициенты мощности установки и отдельных потребителей.

3. Подсчитать расход электроэнергии и ее стоимость при существующем одноставочном тарифе.

Основные теоретические положения

Электрическая цепь с параметрами r, L, C , (рис. 44), не зависящими от тока в цепи и величины напряжения на их зажимах, называется линейной цепью.

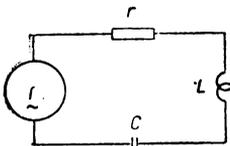


Рис. 44. Последовательная цепь однофазного тока.

В такой цепи при синусоидально подведенном напряжении

$$u = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

устанавливается синусоидальный или гармонический ток

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi), \quad (2)$$

где u и U_m — мгновенное и амплитудное значения напряжения;
 i и I_m — мгновенное и амплитудное значения тока;
 t — время;
 ω — угловая частота;
 φ — угол сдвига фаз между напряжением и током.

Угловая частота может быть подсчитана из соотношения

$$\omega = 2\pi f, \quad (3)$$

а величина угла сдвига фаз между напряжением и током найдена по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}. \quad (4)$$

Величины, входящие в формулу (4)

$$x_L = \omega L \quad (5)$$

и

$$x_c = \frac{1}{\omega C}, \quad (6)$$

называются соответственно индуктивным и емкостным сопротивлением, а их разность

$$x = x_L - x_c \quad (7)$$

— реактивным сопротивлением цепи.

В зависимости от того, какая из этих двух величин — x_L или x_c — окажется большей, в цепи будет преобладать индуктивная или емкостная нагрузка.

При $x_L > x_c$ преобладающей нагрузкой будет индуктивная и угол сдвига фаз ϕ между напряжением и током станет положительным, т. е. ток будет отставать в своем изменении по времени от напряжения.

Если же $x_L < x_c$, то преобладает емкостная нагрузка и угол ϕ станет отрицательным, т. е. ток будет опережать в своем изменении по времени напряжение.

В частном случае, когда $x_L = x_c$, угол сдвига фаз ϕ будет равен нулю и такой режим называется резонансом напряжений индуктивности и емкости.

Резонанс напряжений имеет место при частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (8)$$

которая называется резонансной частотой.

Зависимость между эффективными значениями тока, напряжения и параметрами цепи с последовательным соединением r , L , C устанавливается соотношением

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (9)$$

где знаменатель

$$z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (10)$$

называется полным сопротивлением цепи.

Полное сопротивление цепи больше активного сопротивления r и может быть равно ему только при резонансе напряжений индуктивности и емкости.

Объясняется это тем, что в цепи переменного тока ток определяется не только величиной приложенного напряжения U и активного сопротивления r , но также зависит от реактивных электродвижущих сил индуктивности и емкости.

Последние уравниваются составляющими напряжения, подведенного к цепи, которые соответственно равны

$$U_L = I\omega L \quad (11)$$

и

$$U_c = I \cdot \frac{1}{\omega C}. \quad (12)$$

Только в частном случае взаимной компенсации этих величин полное сопротивление z будет равно активному сопротивлению r .

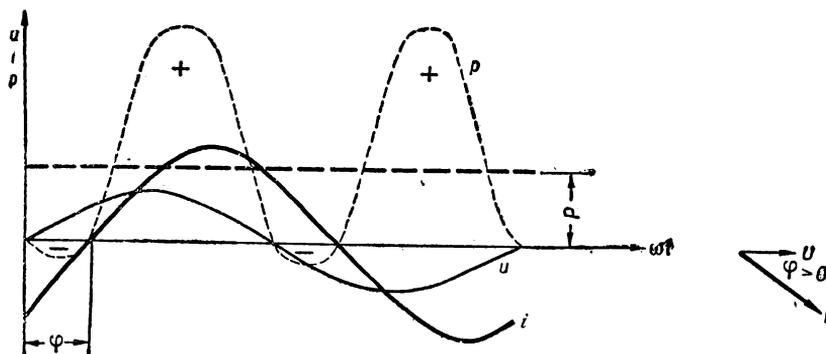


Рис. 45. Линейные и векторная диаграммы при индуктивной нагрузке с $\cos \varphi = 0,7$.

В рассматриваемой цепи мгновенная мощность, равная произведению мгновенных значений напряжения (1) и тока (2), выразится как

$$p = UI [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)]. \quad (13)$$

На рис. 45 приведены линейные диаграммы $u = F(\omega t)$, $i = F(\omega t)$, $p = F(\omega t)$ и векторная диаграмма напряжения и тока для индуктивной нагрузки при $\varphi = 45^\circ$, а также показана линия средней мощности за период, равная

$$P = UI \cos \varphi. \quad (14)$$

Как видно из уравнения (14), средняя мощность за период зависит не только от эффективных значений напряжения U и тока I , но еще и от коэффициента мощности $\cos \varphi$, величина которого определяется характером нагрузки.

Рациональное использование электрического оборудования различных электроустановок может быть достигнуто только тогда, когда потребители электроэнергии обладают высоким коэффициентом мощности, близким к единице.

Уравнение (14) позволяет по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра вычислить коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}. \quad (15)$$

Значения индуктивности L , gH и емкости C , ϕ согласно выражений (11) и (12) находятся как

$$L = \frac{U_L}{\omega I} \quad (16)$$

и

$$C = \frac{I}{\omega U_C}. \quad (17)$$

Реальная катушка, кроме индуктивного сопротивления x_L , обладает еще активным сопротивлением r_k .

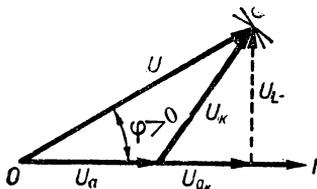


Рис. 46. Векторная диаграмма напряжений и тока для последовательного соединения активного сопротивления с катушкой.

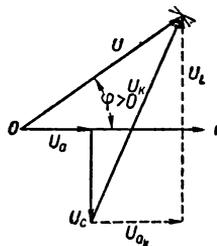


Рис. 47. Векторная диаграмма напряжений и тока при последовательном соединении активного сопротивления, конденсатора и катушки.

Поэтому напряжение на ее зажимах может быть представлено в следующем виде:

$$U_k = I \sqrt{r_k^2 + x_L^2}. \quad (18)$$

Векторная диаграмма напряжений и тока для случая последовательного соединения активного сопротивления r с катушкой, обладающей полным сопротивлением z_k , представлена на рис. 46, причем

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_L^2}. \quad (19)$$

Разложив вектор напряжения U_k на активную U_{a_k} и реактивную U_L составляющие (см. рис. 46) и, применив соотношение (16), можно найти индуктивность катушки L .

В катушке со стальным сердечником величина L при разной величине тока I изменяется из-за проявляющегося явления магнитного насыщения стали, т. е. в этом случае $L = f(I)$ и такая электрическая цепь будет нелинейной.

Векторная диаграмма для случая, когда в цепи имеется последовательное соединение активного сопротивления r , конденсатора емкостью C и индуктивной катушки с полным сопротивлением z_k , представлена на рис. 47.

В случае последовательного соединения активного сопротивления r с емкостью C векторная диаграмма сводится к обычному треугольнику напряжений, изображенному на рис. 48.

Расход активной электроэнергии в последовательной цепи находится по формуле

$$W = Pt, \quad (20)$$

а стоимость ее по одноставочному тарифу

$$s = s_0 \cdot W \cdot 10^{-2}, \quad (21)$$

где s — стоимость израсходованной энергии, руб.;

s_0 — действующий тариф на отпуск электроэнергии, коп/квт-ч.

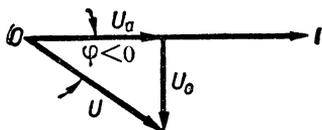


Рис. 48. Треугольник напряжений при последовательном соединении активного сопротивления с емкостью.

Описание схемы установки

Для проведения опыта собрать установку, состоящую из последовательно соединенных лампы накаливания r , катушки z_k и конденсатора C .

Параллельно всем потребителям подключены штепсельные розетки, в которые можно вставлять короткозамкнутые вилки, и получать электрические цепи с различными параметрами.

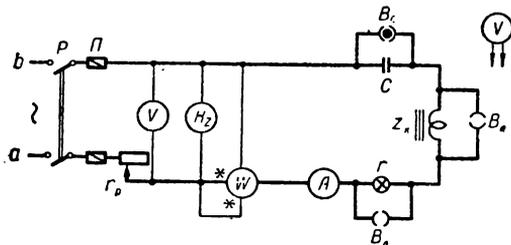


Рис. 49. Схема исследования последовательной цепи однофазного тска.

Питание установки осуществляется от сети однофазного тока $a - b$ через двухполюсный рубильник P , плавкие предохранители Π и регулировочный реостат r_p , которым можно поддерживать заданное напряжение на зажимах исследуемой цепи.

Вольтметр со щупами служит для поочередного измерения напряжения на зажимах отдельных электроприемников.

Ваттметр рекомендуется брать электродинамической системы, а остальные приборы могут быть электромагнитной системы.

Проведение опыта

1. Собрать последовательную часть схемы, после чего приключить вольтметр, частотомер и параллельную обмотку ваттметра.

2. Включить полностью регулировочный реостат r_p , замкнуть короткозамкнутыми вилками зажимы реактивных потребителей и, после проверки схемы руководителем замкнуть двухполюсный рубильник P .

3. Ползунком регулировочного реостата r_p отрегулировать величину напряжения на входе схемы до заданного значения U и записать показания всех приборов.

4. Прodelать то же при включении катушки, конденсатора, последовательном соединении лампы накаливания с катушкой, затем лампы накаливания с конденсатором и при наличии всех трех последовательно соединенных электроприемников.

При проведении опытов изменение схемы производить с помощью двух короткозамкнутых вилок, напряжение на зажимах электроприемников измерять вольтметром со щупами, поддерживая при этом напряжение на входе схемы неизменным.

Результаты опытов свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение на зажимах, в				Частота f , гц	Ток I , а	Активная мощность P , вт	Положения закорачивающих вилок		
	всей цепи U	лампы U_L	катушки U_K	конденсатора U_C				B_L	B_K	B_C
1			—	—					●	●
2		—		—			●			●
3		—	—				●	●		
4				—						●
5			—					●		
6										

Примечание. Знак «●» соответствует включенной вилке.

5. Составить перечень аппаратуры, использованной при проведении опыта с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и тока для всех шести случаев нагрузки.

2. Пользуясь векторными диаграммами и необходимыми формулами, рассчитать для всех случаев нагрузки следующие величины:

коэффициенты мощности всей цепи $\cos \varphi$ и отдельных электроприемников $\cos \varphi_L$, $\cos \varphi_K$ и $\cos \varphi_C$;

сопротивления: лампы r , катушки z_k , x_L , r_k и конденсатора x_c ;

величину индуктивности катушки L и емкости конденсатора C .

3. Таблицу наблюдений дополнить расчетными данными и представить в виде единой таблицы.

№ опытов	Данные наблюдений							Результаты вычислений											
	$U, \text{в}$	$U_{\text{л}}, \text{в}$	$U_{\text{к}}, \text{в}$	$U_{\text{с}}, \text{в}$	$f, \text{ц}$	$I, \text{а}$	$P, \text{вт}$	$\cos \varphi$	$\cos \varphi_{\text{л}}$	$\cos \varphi_{\text{к}}$	$\cos \varphi_{\text{с}}$	$r, \text{ом}$	$z_{\text{к}}, \text{ом}$	$x_L, \text{ом}$	$r_{\text{к}}, \text{ом}$	$L, \text{гн}$	$x_{\text{с}}, \text{ом}$	$C, \text{мкф}$	
1			—	—						—	—		—				—	—	
2		—		—					—		—							—	—
3		—	—						—		—		—						—
4				—						—	—							—	—
5			—							—	—			—			—		—
6																			—

4. Объяснить причины изменения величины сопротивления нити лампы накаливания, величины индуктивности катушки, полученные в результате проведенных опытов.

5. Подсчитать квартальный расход электроэнергии и ее стоимость по одноставочному тарифу, если установка работает круглосуточно при наибольшей измеренной мощности и тарифе на электроэнергию $s_0 = 40 \text{ коп/квт-ч}$.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 79—93, 156—159, 166.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 160—184, 190—202, 301—305, 322, 326—327.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 127—154, 241—242, 250—252.

Работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Построить векторные диаграммы напряжения и токов при различных значениях параметров электроприемников в параллельной цепи однофазного тока.

2. Построить резонансные кривые в функции величины компенсирующей емкости.
3. Рассчитать стоимость израсходованной электроэнергии по двухставочному тарифу.

Основные теоретические положения

При параллельном соединении в цепи однофазного тока (рис. 50) общий ток I может быть определен как геометрическая сумма токов отдельных потребителей I_1, I_2, \dots, I_n , т. е.,

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \dots + \bar{I}_n. \quad (1)$$

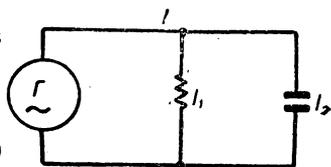


Рис. 50. Параллельная цепь однофазного тока.

Заменяв общий ток, потребляемый всеми электроприемниками, активной I_a и реактивной I_p составляющими, уравнение (1) можно представить следующими двумя алгебраическими выражениями:

$$I_a = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2 + \dots + I_n \cos \varphi_n \quad (2)$$

и

$$I_p = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2 + \dots + I_n \sin \varphi_n, \quad (3)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — углы сдвига фаз между напряжением U и токами I_1, I_2, \dots, I_n отдельных электроприемников.

Ток каждого потребителя

$$I_i = \frac{U}{z_i}, \quad (4)$$

где U — напряжение на зажимах нагрузки;
 z_i — полное ее сопротивление.

Угол сдвига фаз между напряжением и током каждого электроприемника определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{x_i}{r_i}, \quad (5)$$

где x_i — реактивное сопротивление потребителя электрической энергии;

r_i — активное сопротивление.

В зависимости от знака реактивного сопротивления x_i , угол φ_i может быть положительный или отрицательный.

При индуктивной нагрузке ток будет отставать от напряжения и угол φ_i будет больше нуля, а при емкостной — опережать напряжение и угол φ_i станет меньше нуля.

Если в одной из параллельных ветвей преобладает индуктивная нагрузка, а в другой емкостная, то соответствующим подбором во второй цепи величины емкости

$$C = \frac{I_2}{\omega U} = \frac{I_1 \sin \varphi_1}{\omega U} \quad (6)$$

можно реактивную составляющую I_p общего тока свести к нулю.

При этом будет достигнута полная компенсация сдвига фаз и общий коэффициент мощности установки

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} \quad (7)$$

будет равен единице, а угол φ — нулю (рис. 51).

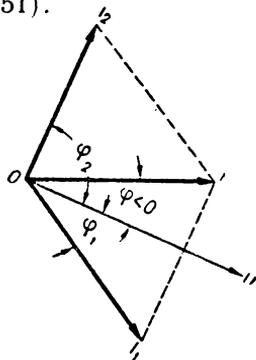
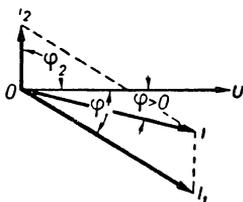
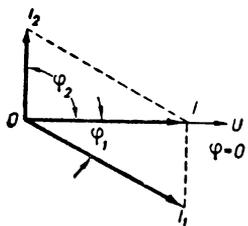


Рис. 51. Векторная диаграмма напряжения и токов при резонансе в параллельной цепи.

Рис. 52. Векторная диаграмма напряжения и токов при недокомпенсации.

Рис. 53. Векторная диаграмма напряжения и токов при перекомпенсации.

В этом случае источник электрической энергии и подводящая линия полностью разгрузятся от реактивного тока и в цепи будет наблюдаться явление резонанса, широко используемое в промышленности для улучшения коэффициента мощности предприятий. Практически это явление достигается параллельным подключением к индуктивной нагрузке статических конденсаторов соответствующей емкости. Если величина подключаемой емкости C будет меньше или больше значения, определяемого формулой (6), то общий ток увеличится по сравнению с прежним его значением, имевшим место при резонансе.

В первом случае будет иметь место недокомпенсация (рис. 52), а во втором — перекомпенсация сдвига фаз (рис. 53).

Оба эти случая с точки зрения работы генератора и подводящей линии нежелательны, так как при неизменной активной нагрузке потребителей увеличение общего тока вызывает дополнительные потери энергии в генерирующей и передающей частях электросистемы.

Для того чтобы добиться борьбы предприятий за высокое значение коэффициента мощности введен двухставочный тариф оплаты за пользование электрической энергией.

Этот тариф применяется для всех промышленных предприятий с присоединенной мощностью от 50 *кв*а и выше.

Он предусматривает оплату за присоединенную мощность электроприемников (основная плата), за израсходованную электроэнергию в *квт-ч* (дополнительная плата), а также начисление скидки или надбавки к основной и дополнительной плате за величину коэффициента мощности.

В соответствии с этим стоимость электроэнергии, израсходованной за один месяц, по двухставочному тарифу определяют по формуле

$$s = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \left(\frac{g}{12} \cdot S_{\text{пр}} + d \cdot W_a \cdot 10^{-2}\right), \quad (8)$$

где s — стоимость потребленной электроэнергии, *руб/мес*;

g — стоимость оплаты за 1 *кв*а присоединенной мощности электроприемников, *руб/год кв*а;

$S_{\text{пр}}$ — присоединенная мощность электрооборудования, *кв*а;

d — стоимость 1 *квт-ч* отпущенной электроэнергии, *коп/квт*;

W_a — потребленная активная электроэнергия, *квт-ч/мес*.

В данной работе расчет по двухставочному тарифу производится условно с целью обучения этому приему, так как мощность установки значительно меньше 50 *кв*а. Присоединенную мощность определяют по формуле

$$S_{\text{прис}} = UI_1, \quad (9)$$

а израсходованную энергию за определенный промежуток времени находят из выражения

$$W_a = Pt. \quad (10)$$

Величины g и d определяют по специальной таблице тарифов на отпуск электроэнергии, краткие выдержки из которой приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование энергоснабжающей организации	Основная плата g , <i>руб/год кв</i> а	Дополнительная плата d , <i>коп/квт-ч</i>
Горэнерго	149	10,7
Ивэнерго	216	8,5
Мосэнерго	120	10,9
Ярэнерго	170	9,9
Белорусэнерго	264	24,2
Ленэнерго	154	11,7
Эстонэнерго	331	16,0
Азэнерго	79	9,7
Арменэнерго	86	2,0
Грузэнерго	66	4,5
Донбассэнерго	108	4,4
Киевэнерго	97	6,9
Крымэнерго	131	7,2
Одессэнерго	168	11,6
Главуралэнерго	141	6,6

Размер скидки или надбавки на стоимость электроэнергии учитывается величиной α , которая выбирается в зависимости от коэффициента мощности предприятия (табл. 3).

Фактическая стоимость 1 кВт-ч в копейках для предприятия, оплачивающего электроэнергию по двухставочному тарифу, будет

$$d_0 = \frac{s \cdot 10^2}{W_a} . \quad (11)$$

Описание схемы установки

Для проведения опыта собрать установку (рис. 54), состоящую из параллельно соединенных реактивной катушки z_k , обладающей значительным активным сопротивлением, и конденсаторной батареи переменной емкости C .

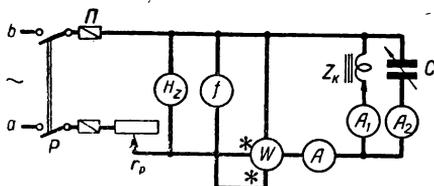


Рис. 54. Схема исследования параллельной цепи однофазного тока.

Питание установки осуществляется от сети однофазного тока $a-b$ через двухполюсный рубильник P , плавкие предохранители Π и регулировочный реостат r_p ,

которым на протяжении всего опыта поддерживается неизменное напряжение на зажимах электроприемников.

Ваттметр рекомендуется брать электродинамической системы, а остальные приборы — электромагнитной.

Проведение опыта

1. Собрать последовательную часть схемы без конденсаторов, затем присоединить конденсаторы, вольтметр, частотомер и параллельную обмотку ваттметра.

2. Включить полностью регулировочный реостат r_p и, выключив переключателями все конденсаторы ($C = 0$), после проверки схемы руководителем, замкнуть двухполюсный рубильник P .

3. Отрегулировать ползунком регулировочного реостата величину напряжения на зажимах электроприемников до заданного значения U и поддерживать его на протяжении всего опыта неизменным.

4. Записав показания всех приборов, включить наименьшую емкость и вновь записать показания приборов.

В дальнейшем, поддерживая постоянное напряжение, увеличивать емкость и при каждом ее значении записывать результаты измерений.

Таблица 3

$\cos \varphi$	α	$\cos \varphi$	α	$\cos \varphi$	α
1,00—0,96	— 6	0,77	+ 11,5	0,58	+ 61
0,95	— 5,5	0,76	+ 13	0,57	+ 64
0,94	— 5	0,75	+ 14,5	0,56	+ 67
0,93	— 4,5	0,74	+ 16	0,55	+ 70
0,92	— 4	0,73	+ 17,5	0,54	+ 73
0,91	— 3,5	0,72	+ 19	0,53	+ 76
0,90	— 3	0,71	+ 22	0,52	+ 79
0,89	— 2,5	0,70	+ 25	0,51	+ 82
0,88	— 2	0,69	+ 28	0,50	+ 85
0,87	— 1,5	0,68	+ 31	0,49	+ 88
0,86	— 1	0,67	+ 34	0,48	+ 91
0,85	0	0,66	+ 37	0,47	+ 94
0,84	+ 1	0,65	+ 40	0,46	+ 97
0,83	+ 2,5	0,64	+ 43	0,45	+ 100
0,82	+ 4	0,63	+ 46	0,44	+ 103
0,81	+ 5,5	0,62	+ 49	0,43	+ 106
0,80	+ 7	0,61	+ 52	0,42	+ 109
0,79	+ 8,5	0,60	+ 55	0,41	+ 112
0,78	+ 10	0,59	+ 58	0,40	+ 115

При проведении опыта следует обратить внимание, что вначале, при увеличении емкости, общий ток (отстающий) будет уменьшаться, а затем, *после прохождения резонанса токов*, начнет снова возрастать и будет опережать напряжение по времени.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Частота $f, гц$	Активная мощность $P, вт$	Токи, a			Величина компенсирующей емкости $C, мкф$
				общий I	индуктивной нагрузки I_1	емкостной нагрузки I_2	
1							0
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

5. Составить перечень аппаратуры, использованной при проведении опыта с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. По данным опытов построить векторные диаграммы напряжения и токов для случаев $\varphi > 0$, $\varphi = 0$, $\varphi < 0$, указав на них соответствующие номера опытов.

2. Пользуясь данными наблюдений и необходимыми теоретическими соотношениями, рассчитать для каждого произведенного опыта: коэффициент мощности установки $\cos \varphi$, сопротивления — всей цепи z , реактивной катушки z_k , конденсаторной батареи x_c , а также величину ее реактивной мощности

$$Q_c = UI_2. \quad (12)$$

3. Данные наблюдений дополнить расчетными величинами и представить в виде таблицы.

№ опытов	Данные наблюдений							Результаты вычислений				
	$U, в$	$f, гц$	$P, вт$	$I, а$	$I_1, а$	$I_2, а$	$C, мкф$	$\cos \varphi$	$z, ом$	$z_k, ом$	$x_c, ом$	$Q_c, вар$
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

4. Построить в масштабе в одной координатной системе зависимости:

$$\cos \varphi = F(C); I = F(C); z = F(C); I_2 = F(C),$$

а в другой — $C = F(\cos \varphi); Q_c = F(\cos \varphi)$.

5. Установить по кривым то значение коэффициента мощности $\cos \varphi$, с которого начинается значительное возрастание потребной для компенсации емкости C и ее реактивной мощности Q_c .

6. Определить стоимость месячной эксплуатации установки применительно к заданной энергосистеме и фактическую стоимость $1 \text{ квт}\cdot\text{ч}$ при отсутствии компенсирующей емкости и при резонансе токов, а также подсчитать месячную экономию средств на оплату электроэнергии при наличии конденсаторной батареи.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 93—96, 156—159, 166.
 Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 209—222, 301—305, 322, 326—327.
 Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 154—166, 241—242, 250—252.
 Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 258—262, 278—281.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы

1. Освоить метод определения нейтрального провода в трехфазной четырехпроводной сети.
2. Соединить электроприемники однофазного тока звездой и включить их в сеть трехфазного тока.
3. Установить соотношения между линейными и фазными напряжениями при различных видах нагрузки.
4. Построить по опытным данным векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной цепи при равномерной и неравномерной нагрузке фаз.
5. Выяснить влияние обрыва нулевого или линейного провода на работу установки.
6. Измерить мощность трехфазной системы при помощи ваттметров однофазного тока.

Основные теоретические положения

Практическое нахождение нулевого провода в трехфазной четырехпроводной системе можно осуществить при помощи вольтметра или контрольной лампы (если линейное напряжение до 220 в) поочередным включением их между каждой парой проводов.

Провод, между которым и каждым из остальных проводов напряжение будет наименьшее, является нулевым.

При воздушных сетях его можно также определить по меньшему сечению по сравнению с другими тремя проводами.

Для соединения трех электроприемников однофазного тока I, II, III звездой необходимо концы их x, y, z соединить в одну общую так называемую нулевую точку O , а к оставшимся свободным концам a, b, c подвести энергию от трехфазной системы (рис. 55).

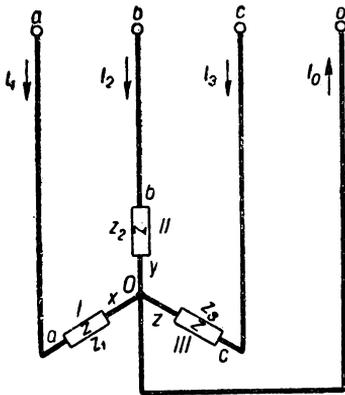


Рис. 55. Соединение нагрузки звездой и подключение ее к сети трехфазного тока.

Нейтральная или нулевая точка нагрузки O может быть присоединена к четвертому уравнительному или нулевому проводу.

Если сопротивления электроприемников отдельных фаз z_1, z_2, z_3 будут равны между собой, т. е.

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_\phi \quad (1)$$

и коэффициенты мощности их $\cos \varphi_1, \cos \varphi_2, \cos \varphi_3$ одинаковы

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi_3 = \cos \varphi, \quad (2)$$

то такая нагрузка называется равномерной.

При равномерной нагрузке надобность в нейтральном проводе отпадает, так как ток в нем

$$I_0 = 0 \quad (3)$$

и подводящая электрическую энергию линия выполняется трехпроводной.

При соединении нагрузки звездой ток в подводящих проводах, так называемый линейный ток I_λ , является одновременно и током соответствующей фазы нагрузки I_ϕ , т. е.

$$I_\lambda = I_\phi. \quad (4)$$

Величина фазного тока I_ϕ определяется фазным напряжением на зажимах электроприемника U_ϕ и его полным сопротивлением z_ϕ

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{z_\phi}. \quad (5)$$

Величина фазного напряжения U_ϕ при симметричной трехфазной системе и равномерной нагрузке фаз отличается от междофазного или линейного U_λ в $\sqrt{3}$ раз, т. е. оно связано с ним соотношением

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi = 1,73 U_\phi. \quad (6)$$

В общем случае, когда трехфазная система не симметрична, линейные напряжения U_{12}, U_{23}, U_{31} связываются с фазными U_{10}, U_{20}, U_{30} следующими векторными уравнениями:

$$\bar{U}_{12} = \bar{U}_{10} - \bar{U}_{20}. \quad (7)$$

$$\bar{U}_{23} = \bar{U}_{20} - \bar{U}_{30}. \quad (8)$$

$$\bar{U}_{31} = \bar{U}_{30} - \bar{U}_{10}. \quad (9)$$

При симметричной трехфазной системе э.д.с. и равномерной нагрузке фаз все фазные напряжения U_{10}, U_{20}, U_{30} одинаковы,

фазные токи I_1, I_2, I_3 равны между собой и сдвинуты относительно своих напряжений на одинаковые углы

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi, \quad (10)$$

определяемые по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_\phi}{r_\phi}, \quad (11)$$

где x_ϕ — реактивное сопротивление фазы нагрузки;
 r_ϕ — активное ее сопротивление.

На рис. 56 представлена векторная диаграмма напряжений и токов при равномерной нагрузке, соединенной звездой, и показаны геометрические соотношения между фазными и линейными напряжениями.

Как видно из диаграммы, звезда линейных напряжений смещена относительно звезды фазных напряжений на 30° .

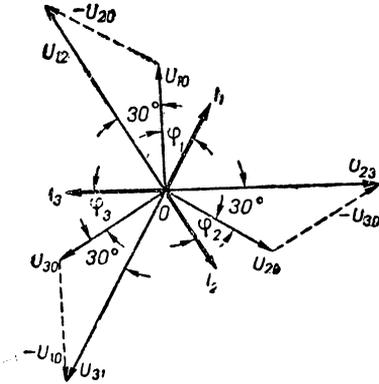


Рис. 56. Векторная диаграмма напряжений и токов при равномерной нагрузке, соединенной звездой.

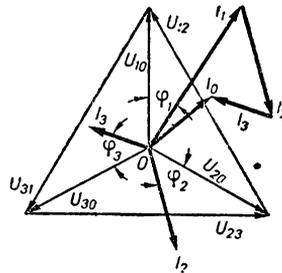


Рис. 57. Топографическая диаграмма при неравномерной нагрузке, соединенной звездой с нейтральным проводом.

В случае неравномерной нагрузки фаз, когда

$$z_1 \neq z_2 \neq z_3, \quad (12)$$

нарушается равенство фазных токов I_1, I_2, I_3 и в нейтральном проводе появляется ток I_0 , равный

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3. \quad (13)$$

На рис. 57 представлена топографическая диаграмма напряжений для случая неравномерной нагрузки с графическим способом определения тока в нейтральном проводе по известным фазным токам I_1, I_2, I_3 , в основу которого положено выражение (13).

При неравномерной нагрузке фаз и наличии нейтрального провода все электроприемники I, II, III находятся почти под одинаковым фазным напряжением

$$U_{10} \cong U_{20} \cong U_{30} \cong U_{\phi}, \quad (14)$$

если не учитывать небольшую различную потерю напряжения в подводящих проводах из-за неравенства протекающих в них токов.

В случае обрыва нейтрального провода нормальный режим работы установки нарушается.

Фазные токи при прежней неравномерной нагрузке изменяются и устанавливаются такими, чтобы их сумма была равна нулю.

В результате этого происходит искажение симметрии фазных напряжений — наиболее загруженная фаза оказывается под сниженным, а менее загруженная под повышенным напряжением по сравнению с номинальным значением фазного напряжения (рис. 58).

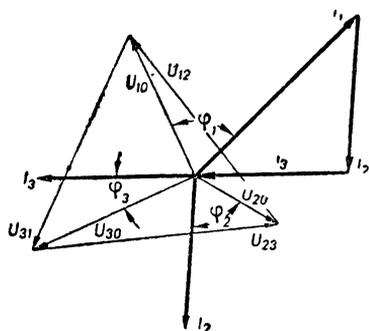


Рис. 58. Топографическая диаграмма при неравномерной нагрузке, соединенной звездой без нейтрального провода.

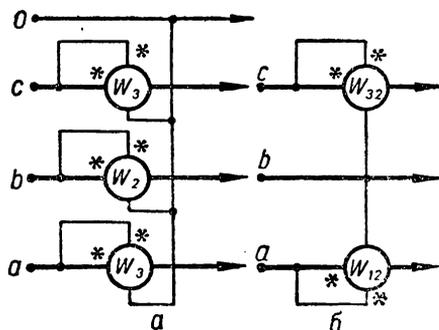


Рис. 59. Схема измерения мощности трехфазной системы при помощи трех и двух ваттметров однофазного тока.

Так как подобные ненормальности при эксплуатации недопустимы, то на целостность нейтрального провода обращается особое внимание. Рубильники, предохранители и прочие устройства, способные вызвать отключение его от нейтральной точки потребителей, не должны включаться в нулевой провод.

При обрыве линейного провода потребители этой фазы остаются без энергии, а потребители двух других фаз продолжают питаться от трехфазной системы. Если при этом есть нейтральный провод, то на них обрыв чужого линейного провода практически не сказывается, а при отсутствии его происходит перераспределение напряжений на зажимах обоих электроприемников пропорционально величинам их сопротивлений.

Мощность, потребляемая электроприемниками, соединенными звездой, может быть подсчитана по формуле

$$P = U_{10}I_1 \cos \varphi_1 + U_{20}I_2 \cos \varphi_2 + U_{30}I_3 \cos \varphi_3 \quad (15)$$

и измерена при помощи трех ваттметров однофазного тока, каждый из которых включается на соответствующее фазное напряжение и фазный ток (рис. 59, а).

В случае равномерной нагрузки симметричной трехфазной системы, когда мощность

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi, \quad (16)$$

измерение ее может быть проведено только для одной из фаз и полученный результат утроен, что дает возможность обойтись при измерении всего лишь одним ваттметром однофазного тока.

При отсутствии нейтрального провода мощность трехфазной системы может быть выражена так:

$$P = U_{12}I_1 \cos (\bar{U}_{12}, \bar{I}_1) + U_{32}I_3 \cos (\bar{U}_{32}, \bar{I}_3) \quad (17)$$

и измерена двумя ваттметрами однофазного тока, включенными по схеме, приведенной на рис. 59, б.

Ваттметр W_{12} будет показывать первое слагаемое уравнения (17), а ваттметр W_{32} — второе слагаемое. Алгебраическая сумма их показаний даст мощность, потребляемую электроприемниками трехфазного тока.

При измерении мощности ваттметрами однофазного тока нужно строго соблюдать разметку их концов, подводя энергию к генераторным концам, отмеченным звездочками *, и отводя ее к нагрузке от других концов.

При схеме двух ваттметров и реактивной нагрузке (в частности при $\cos \varphi < 0,5$ и $z_1 = z_2 = z_3 = z_{\phi}$) может случиться, что стрелка одного из ваттметров будет отклоняться от нуля влево. Тогда необходимо изменить направление тока в его последовательной обмотке и отсчетам по этому прибору приписывать знак минус.

Описание схемы установки

Питание экспериментальной установки (рис. 60) осуществляется от четырехпроводной сети трехфазного тока a, b, c, o через трехполюсный рубильник P с предохранителями Π и однополюсный рубильник P_0 .

Амперметрами A_1, A_2, A_3 измеряют линейные токи I_1, I_2, I_3 , а амперметром A_0 — ток в нулевом проводе I_0 .

Вольтметром V с щупами поочередно измеряют три линейные U_{12}, U_{23}, U_{31} и три фазные U_{10}, U_{20}, U_{30} напряжения на *звездах* ламповых реостатов $a - x, b - y, c - z$.

Три ваттметра однофазного тока с добавочными сопротивле-

ниями r_0 служат для измерения мощности. При установке переключателя $P_{вт}$ в положение 0 получается схема трех ваттметров, а в положение b — схема двух ваттметров (ваттметр W_2 при этом не работает).

Вольтметр и амперметры можно применять электромагнитной, а ваттметры — электродинамической системы.

Проведение опыта

1. Взять контрольную лампу, рассчитанную на линейное напряжение, замкнуть рубильники P и P_0 , и, поочередно приключая ее к каждой паре концов трехфазной линии (*после предохранителей!*), найти нейтральный провод, после чего разомкнуть рубильники и приступить к сборке схемы.

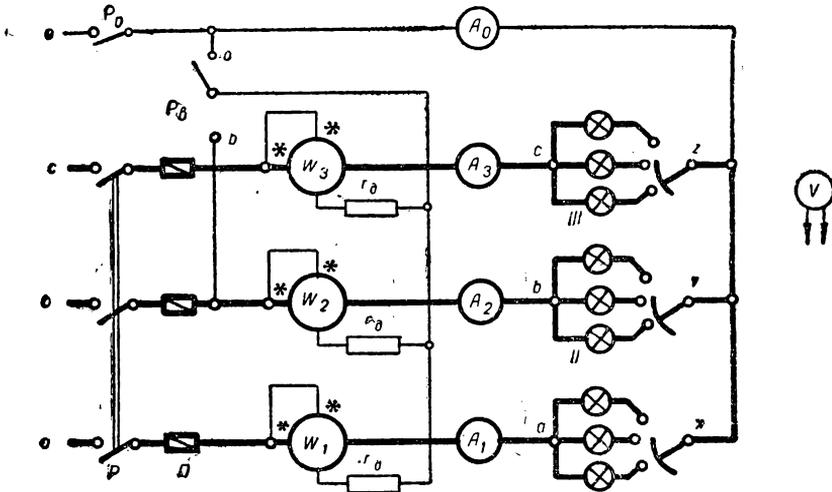


Рис. 60. Схема исследования трехфазной системы при соединении нагрузки звездой.

2. Собрать сначала последовательную часть каждой фазы, затем соединить ламповые реостаты звездой и от их нейтральной точки проложить нейтральный провод через амперметр A_0 и однополюсный рубильник P_0 . Затем следует присоединить параллельные обмотки ваттметров с добавочными сопротивлениями r_0 к проводам сети и переключателю $P_{вт}$.

3. Выключить переключателями ламповых реостатов все лампы, замкнуть рубильник P_0 , поставить ручку переключателя $P_{вт}$ в положение 0 и *после проверки руководителем правильности соединений* включить трехполюсный рубильник P .

Изменяя при помощи переключателей число ламп в каждом ламповом реостате, добиться равномерной нагрузки фаз, при которой амперметры A_1 , A_2 , A_3 должны давать одинаковые по-

казания. Амперметр A_0 , включенный в нейтральный провод, будет при этом показывать нуль.

Вольтметром V со щупами измерить на зажимах электроприемников три линейные U_{12} , U_{23} , U_{31} и три фазные U_{10} , U_{20} , U_{30} напряжения и записать показания всех приборов.

4. Выключить рубильник P_0 , поставить переключатель P_B в положение b и снова провести те же наблюдения, записав их в таблицу.

5. Создать неравномерную нагрузку по фазам и записать отсчеты по всем приборам.

6. Включить рубильником P_0 нейтральный провод, поставить переключатель P_B в положение 0 и записать показания приборов при прежней неравномерной нагрузке фаз.

Обратить внимание на влияние нейтрального провода при неравномерной нагрузке фаз на степень накала нитей электрических ламп!

7. Не изменяя нагрузку, отсоединить один из линейных проводов (поворотом пробки плавкого предохранителя) и записать показания приборов, отметив особенности данного режима.

Результаты наблюдений записать в таблицу.

№ опытов	Напряжение, в						Мощности, вт					Токи, а				Примечания
	U_{12}	U_{23}	U_{31}	U_{10}	U_{20}	U_{30}	P_1	P_2	P_3	P_{12}	P_{32}	I_1	I_2	I_3	I_0	
1										—	—					Равномерная нагрузка с нейтральным проводом
2							—	—	—							Равномерная нагрузка без нейтрального провода
3							—	—	—							Неравномерная нагрузка без нейтрального провода
4										—	—					Неравномерная нагрузка с нейтральным проводом
5										—	—					Обрыв линейного провода

8. Составить перечень аппаратуры, использованной при проведении испытания, и привести все ее технические данные.

Обработка результатов испытания

1. Пользуясь результатами наблюдений, найти отношение среднеарифметических значений линейных напряжений к фазным для случаев равномерной нагрузки фаз и сравнить его с теоретическим значением этой величины.

2. Подсчитать мощность, потребляемую каждой фазой электроприемников, для всех случаев нагрузки

$$P'_i = U_{\phi_i} I_{\phi_i} \cos \varphi_i, \quad (18)$$

общую активную мощность всех электроприемников

$$P' = \sum_{i=1}^{i=3} U_{\phi_i} I_{\phi_i} \cos \varphi_i \quad (19)$$

и сравнить ее с мощностью, определяемой по показаниям ваттметров,

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (20)$$

или

$$P = P_{12} \pm P_{32}, \quad (21)$$

а затем определить для всех опытов расхождение

$$P = P' - P. \quad (22)$$

Результаты расчетов объединить с данными наблюдений и свести в таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений										Результаты вычислений									
	$U_{10}, \text{в}$	$U_{20}, \text{в}$	$U_{30}, \text{в}$	$I_1, \text{а}$	$I_2, \text{а}$	$I_3, \text{а}$	$I_0, \text{а}$	$P_1, \text{вт}$	$P_2, \text{вт}$	$P_3, \text{вт}$	$P_{12}, \text{вт}$	$P_{32}, \text{вт}$	$P'_1, \text{вт}$	$P'_2, \text{вт}$	$P'_3, \text{вт}$	$P', \text{вт}$	$P, \text{вт}$	$\Delta P, \text{вт}$	$I'_0, \text{а}$	$\Delta I_0, \text{а}$
1																				
2								—	—	—										
3								—	—	—										
4											—	—								
5											—	—								

3. Построить в масштабе, по опытным данным, для случая равномерной нагрузки фаз векторную диаграмму напряжений и токов, а также две топографические диаграммы, отвечающие случаю неравномерной нагрузки фаз без нейтрального провода и с ним.

4. По построенной топографической диаграмме при наличии нейтрального провода найти графическим способом ток в нем I'_0 и сравнить его с экспериментально полученным значением I_0 , подсчитав разность

$$\Delta I_0 = I'_0 - I_0. \quad (23)$$

5. Объяснить влияние обрыва нейтрального или линейного провода на работу отдельных электроприемников.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 100—105, 107—109, 159—161.
 Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 249—255, 257—261, 267—269, 305—313.
 Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 179—184, 185—190, 195—197, 244—248.

Работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы

1. Определить порядок следования фаз в трехфазной сети.
2. Соединить треугольником электроприемники однофазного тока и включить их в сеть трехфазного тока.
3. Установить соотношения между линейными и фазными токами при различных видах нагрузки.
4. Построить по опытным данным векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной цепи при равномерной и неравномерной нагрузке фаз.
5. Выяснить влияния обрыва линейного провода на работу установки.
6. Измерить мощность трехфазной системы при помощи двухэлементного ваттметра трехфазного тока.

Основные теоретические положения

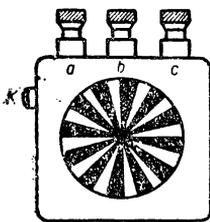


Рис. 61. Внешний вид фазоуказателя.

Порядок следования фаз трехфазной системы может быть определен фазоуказателем.

Последний представляет собой миниатюрный асинхронный электродвигатель трехфазного тока, состоящий из трех катушек со стальным сердечником, над которыми находится стальной диск, сидящий на оси и разделенный на секторы, окрашенные попеременно в белый и черный цвет (рис. 61).

Если три провода, идущие от трехфазной сети, присоединить к его зажимам a , b , c и *кратковременно* нажать на кнопку K , то диск, увлекаемый вра-

щающимся магнитным полем, начнет вращаться в ту или в другую сторону.

В случае вращения его по часовой стрелке наименование фаз соответствует обозначениям клемм на приборе.

В противном случае необходимо любую пару проводов поменять местами и снова нажать кнопку *K*. При этом диск изменит направление вращения и, следовательно, обозначения клемм фазоуказателя явятся одновременно маркировочными отметками проводов трехфазной сети.

Для соединения трех приемников однофазного тока I, II, III треугольником необходимо конец первого — *x* соединить с началом второго — *b*, конец второго — *y* с началом третьего — *c* и конец третьего — *z* с началом первого — *a*.

Полученный треугольник присоединяют к сети трехфазного тока по схеме, представленной на рис. 62.

Если сопротивления всех групп токоприемников будут одинаковы, т. е.

$$z_{12} = z_{23} = z_{31} = z_{\phi} \quad (1)$$

и коэффициенты мощности их $\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$, $\cos \varphi_3$ равны между собой

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \cos \varphi_3 = \cos \varphi, \quad (2)$$

то такая нагрузка называется равномерной.

При соединении треугольником каждый электроприемник оказывается включенным между подводящими проводами, вследствие чего он находится под линейным напряжением U_{Δ} , которое одновременно будет являться и фазным напряжением U_{ϕ} .

Таким образом, при соединении нагрузки треугольником,

$$U_{\Delta} = U_{\phi}. \quad (3)$$

Ток каждого электроприемника, входящего в соединение треугольником, называется фазным и равен

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}}, \quad (4)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение на зажимах данного электроприемника;

z_{ϕ} — его полное сопротивление.

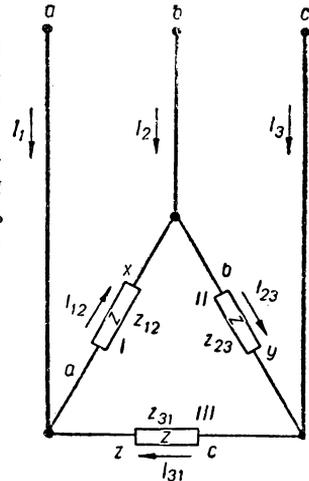


Рис. 62. Соединение нагрузки треугольником и присоединение ее к сети трехфазного тока.

При равномерной нагрузке фазные токи всех фаз одинаковы

$$I_{12} = I_{23} = I_{31} = I_{\phi} \quad (5)$$

и сдвинуты относительно своих фазных напряжений U_{12} , U_{23} , U_{31} на одинаковые углы

$$\varphi_{12} = \varphi_{23} = \varphi_{31} = \varphi, \quad (6)$$

определяемые соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_{\phi}}{r_{\phi}}, \quad (7)$$

где x_{ϕ} — реактивное сопротивление плеча треугольника;
 r_{ϕ} — его активное сопротивление.

Как видно из рис. 62, линейные токи I_1 , I_2 , I_3 , протекающие по проводам a , b , c , будут определяться геометрической разностью соответствующих фазных токов I_{12} , I_{23} , I_{31} , как

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{12} - \bar{I}_{31}, \quad (8)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{23} - \bar{I}_{12}, \quad (9)$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{31} - \bar{I}_{23}. \quad (10)$$

В случае равномерной нагрузки фаз все линейные токи будут равны между собой и превышать фазные токи в $\sqrt{3} = 1,73$ раза, т. е.

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}. \quad (11)$$

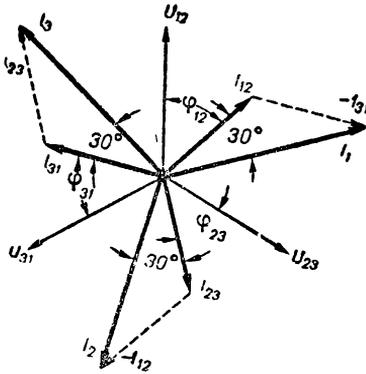


Рис. 63. Векторная диаграмма напряжений и токов для соединения треугольником при равномерной нагрузке фаз.

На рис. 63 представлена соответствующая векторная диаграмма напряжений и токов для соединения треугольником при равномерной нагрузке фаз и показан графический способ нахождения линейных токов I_1 , I_2 , I_3 по фазным I_{12} , I_{23} , I_{31} .

Как видно из диаграммы, при соединении треугольником и равномерной нагрузке фаз звезда линейных токов сдвинута относительно звезды фазных токов на угол 30° .

В случае неравномерной нагрузки фаз, когда

$$z_{12} \neq z_{23} \neq z_{31}, \quad (12)$$

нарушается равенство как фазных, так и линейных токов.

На рис. 64 приведена векторная диаграмма напряжений и токов для неравномерной нагрузки. Первый электроприемник $a - x$ состоит из активной нагрузки ($\varphi_{12} = 0$), второй $b - y$ — из индуктивной с $\varphi_{23} > 0$ и третий $c - z$ — из емкостной нагрузки с $\varphi_{31} < 0$.

Как видно из диаграммы, неравномерная нагрузка фаз вызывает значительную асимметрию линейных токов I_1, I_2, I_3 , которые могут быть найдены по фазным токам графическим способом.

Следует отметить, что изменение нагрузки в одной из однофазной групп, сказывающееся на изменении двух линейных токов, совершенно не влияет на величины фазных напряжений двух других групп, если не учитывать различную потерю напряжения в подводящих проводах из-за асимметрии линейных токов.

При обрыве одного из линейных проводов, например c , нормальный режим работы установки нарушается. Электроприемники фазы I будут находиться под нормальным фазным напряжением U_{12} , а электроприемники фаз II и III окажутся последовательно соединенными и будут питаться от этого же напряжения.

Если их сопротивления равны между собой, т. е.

$$z_{23} = z_{31}, \tag{13}$$

то напряжение U_{12} распределится между ними поровну и оба потребителя окажутся под напряжением, сниженным на 50% по отношению к номинальному.

Если же соотношение (13) не имеет места, то напряжение распределится прямо пропорционально величинам z_{23} и z_{31} , в результате чего фаза с меньшей нагрузкой окажется под большим напряжением, а фаза с большей нагрузкой под меньшим.

Мощность, потребляемая электроприемниками, соединенными треугольником, может быть выражена как

$$P = U_{12}I_1 \cos(\bar{U}_{12}, \bar{I}_1) + U_{32}I_3 \cos(\bar{U}_{32}, \bar{I}_3). \tag{14}$$

Измерить потребляемую мощность можно с помощью двух ваттметров однофазного тока (рис. 65,а) или одним двухэлементным ваттметром трехфазного тока (рис. 65,б).

Схемами, приведенными на рис. 65,а, б, можно пользоваться только в трехпроводных сетях трехфазного тока!

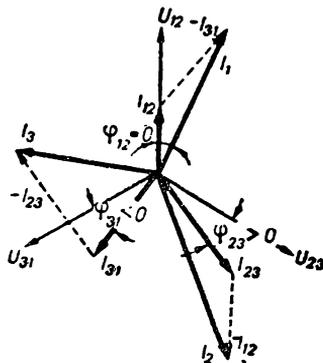


Рис. 64. Векторная диаграмма напряжений и токов для соединения треугольником при неравномерной нагрузке фаз.

Описание схемы установки

Питание экспериментальной установки (рис. 66) осуществляется от сети трехфазного тока a, b, c через трехполюсный рубильник P и плавкие предохранители Π .

Амперметрами A_1, A_2, A_3 измеряют линейные токи I_1, I_2, I_3 , а амперметрами A_{12}, A_{23}, A_{31} — фазные I_{12}, I_{23}, I_{31} .

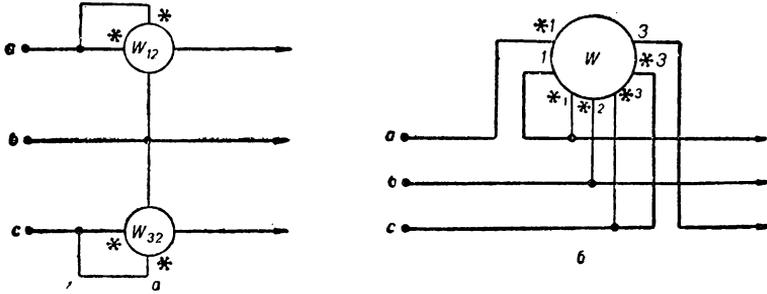


Рис. 65. Схемы измерения мощности трехфазной системы при помощи двух ваттметров однофазного тока и одного двухэлементного ваттметра трехфазного тока.

Двухэлементный киловаттметр трехфазного тока κW служит для измерения потребляемой мощности P , а вольтметром V со щупами измеряют три линейные напряжения U_{12}, U_{23}, U_{31} на зажимах ламповых реостатов $a-x, b-y, c-z$.

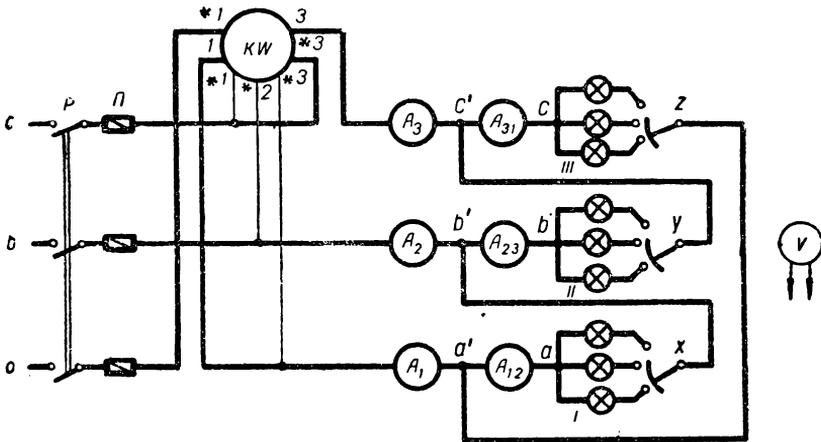


Рис. 66. Схема исследования трехфазной системы при соединении нагрузки треугольником.

Все приборы можно применять электромагнитной системы, κ ваттметр — ферродинамической или индукционной системы.

Проведение опыта

1. Присоединить фазоуказатель к клеммам трехфазной сети и *после проверки схемы соединений, руководителем* включить рубильник P , а затем *кратковременно* нажать и *сейчас же* отпустить кнопку фазоуказателя.

Наблюдая за направлением вращения диска фазоуказателя, установить порядок следования фаз, после чего выключить рубильник P и приступить к сборке основной схемы.

При сборке схемы (рис. 66) рекомендуется сначала собрать все последовательные цепи от предохранителей до входных клемм ламповых реостатов (a, b, c); поставить перемычки $x-b', y-c', z-a'$, образующие соединение треугольником, а затем присоединить параллельные обмотки киловаттметра kW .

2. Выключить переключателями ламповых реостатов все лампы и *после проверки, руководителем* правильности соединений включить трехполюсный рубильник P .

Изменяя при помощи переключателей число ламп в каждом ламповом реостате, добиться равномерной нагрузки по всем трем фазам. Равномерная нагрузка будет при равенстве показаний фазных амперметров.

Затем, пользуясь вольтметром со щупами, измерить три фазные напряжения U_{12}, U_{23}, U_{31} .

Результаты наблюдений записать в таблицу и повторить опыт при неравномерной нагрузке фаз, а также при одном отключенном линейном проводе.

№ опытов	Напряжения, в			Мощность, квт P	Линейные токи, а			Фазные токи, а			Примечания
	U_{12}	U_{23}	U_{31}		I_1	I_2	I_3	I_{12}	I_{23}	I_{31}	
1											Равномерная нагрузка фаз
2											Неравномерная нагрузка фаз
3											Обрыв одного линейного провода

3. Составить перечень аппаратуры, использованной при опыте, с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Пользуясь результатами наблюдений, найти отношение среднеарифметических значений линейных токов к фазным для случая равномерной нагрузки фаз и сравнить его с теоретическим значением этой величины.

2. Подсчитать мощность, потребляемую каждой фазой электроприемников для всех случаев нагрузки,

$$P'_i = U_{\Phi_i} I_{\Phi_i} \cos \varphi_i, \quad (15)$$

а также общую активную мощность всех электроприемников

$$P' = \sum_{i=1}^{i=3} U_{\Phi_i} I_{\Phi_i} \cos \varphi_i \quad (16)$$

и сравнить ее с показаниями киловаттметра, установив величину расхождения ΔP для всех опытов

$$\Delta P = P - P'. \quad (17)$$

Результаты расчетов свести в таблицу, объединив ее с таблицей наблюдений.

№ опытов	Данные наблюдений							Результаты вычислений				
	$U_{12}, \text{ в}$	$U_{23}, \text{ в}$	$U_{31}, \text{ в}$	$P, \text{ квт}$	$I_{12}, \text{ а}$	$I_{23}, \text{ а}$	$I_{31}, \text{ а}$	$P'_1, \text{ квт}$	$P'_2, \text{ квт}$	$P'_3, \text{ квт}$	$P', \text{ квт}$	$\Delta P, \text{ квт}$
1												
2												
3												

3. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для равномерной и неравномерной нагрузок фаз и, пользуясь полученными из опыта величинами фазных токов I_{12} , I_{23} , I_{31} , найти графическим методом линейные токи I'_1 , I'_2 , I'_3 , как соответствующую геометрическую разность фазных токов и сопоставить их с величинами, полученными из опыта I_1 , I_2 , I_3 , вычислив для каждого опыта расхождение

$$\Delta I_i = I'_i - I_i. \quad (18)$$

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Значения линейных токов, a						Расхождение, a		
	полученных при опыте			из векторной диаграммы					
	I_1	I_2	I_3	I'_1	I'_2	I'_3	ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3
1									
2									

4. Привести соображения о влиянии обрыва провода в сети на работу электроприемников.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 105—108, 109—110, 159—161.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 255—257, 261—269, 305—313.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 184—185, 190—197, 244—248.

РАЗДЕЛ 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Работа № 12

ПОВЕРКА ГРАДУИРОВКИ ТЕХНИЧЕСКИХ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА ПО КОНТРОЛЬНЫМ ПРИБОРАМ

Цель работы

1. Освоить метод поверки технических электроизмерительных приборов по контрольным.
2. Определить абсолютные погрешности и поправки к показаниям технических электроизмерительных приборов.
3. Установить наибольшие приведенные погрешности поверяемых приборов.
4. Определить мощности, потребляемые техническими электроизмерительными приборами.

Основные теоретические положения

Технические электроизмерительные приборы нуждаются в периодической поверке, т. е. в сравнении их показаний с показаниями более точных приборов, принимаемых за образцовые.

При поверке обычно определяются: абсолютные погрешности, поправки к показаниям прибора, приведенная погрешность и собственное потребление мощности прибором при полном отклонении стрелки.

Абсолютные погрешности вольтметра ΔU или амперметра ΔI определяются разностью между величинами, указываемыми поверяемыми приборами U или I , и действительными значениями измеряемых ими величин U_0 или I_0 , т. е.

$$\Delta U = U - U_0 \quad (1)$$

и

$$\Delta I = I - I_0 \quad (2)$$

Поправки к их показаниям ΔU_0 и ΔI_0 находятся, как разность между действительными значениями измеряемых величин U_0 и I_0 и показаниями поверяемых приборов U и I , т. е.

$$\Delta U_0 = U_0 - U \quad (3)$$

и

$$\Delta I_0 = I_0 - I. \quad (4)$$

Абсолютные погрешности и поправки к показаниям приборов могут иметь положительные и отрицательные значения.

Наибольшие приведенные погрешности вольтметра ΔU и амперметра ΔI выражаются в процентах верхних пределов показаний приборов U_n и I_n с учетом поправок к их показаниям, т. е. как

$$\gamma'_{\text{прив}} = \frac{(\Delta U)_{\text{max}}}{U_n} \cdot 100\%, \quad (5)$$

$$\gamma''_{\text{прив}} = \frac{(\Delta I)_{\text{max}}}{I_n} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Величины $\gamma'_{\text{прив}}$ и $\gamma''_{\text{прив}}$, подсчитанные по формулам (5) и (6) для приборов, пригодных к эксплуатации, не должны превышать значений, установленных для данного класса поверяемого прибора.

Если это не соблюдается, то прибор должен быть отремонтирован и вновь поверен, а в случае необходимости переградуирован и даже переведен в более низкий класс точности.

Техника поверки технических приборов по контрольным заключается в непосредственном сравнении показаний поверяемых приборов с отсчетами по аналогичным приборам более высокого класса точности (не ниже 0,5), принимаемых в качестве образцовых.

При производстве поверки следует так регулировать измеряемую приборами величину (напряжение или ток), чтобы стрелка поверяемого прибора в момент отсчета находилась строго против деления шкалы.

Число выверяемых точек берут от 5 до 10 в зависимости от степени равномерности шкалы приборов.

При поверке на постоянном токе в качестве образцовых приборов используют приборы магнитоэлектрической, а в цепях переменного тока — электродинамической системы.

Приборы класса точности 1,0, 1,5, 2,5 и 4,0 должны быть перед поверкой прогреты током при полном отклонении стрелки, после чего ток должен быть выключен, а стрелка установлена регулировочным винтом на нулевое деление шкалы.

Сопротивление обмотки поверяемого вольтметра и потребляемая ею мощность при полном отклонении стрелки находятся из соотношений

$$r_{\text{в}} = \frac{U_n}{I_{\text{в}}} \quad (7)$$

и

$$P_v = U_n I_v, \quad (8)$$

где r_v — сопротивление обмотки вольтметра, *ом*;

U_n — наибольшее напряжение, измеренное поверяемым вольтметром, с учетом поправки к его показанию при полном отклонении стрелки, *в*;

I_v — ток, потребляемый обмоткой вольтметра при полном отклонении стрелки, *а*;

P_v — мощность, потребляемая обмоткой вольтметра при полном отклонении стрелки, *вт*.

Аналогичные величины для поверяемого амперметра определяются по формулам

$$r_a = \frac{U_a}{I_n} \quad (9)$$

и

$$P_a = U_a I_n, \quad (10)$$

где r_a — сопротивление обмотки амперметра, *ом*;

U_a — падение напряжения на амперметре при полном отклонении стрелки, *в*;

I_n — наибольший ток, измеренный поверяемым амперметром с учетом поправки к его показанию при полном отклонении стрелки, *а*;

P_a — мощность, потребляемая амперметром при полном отклонении его стрелки, *вт*.

Описание схемы установки

Регулирование величины напряжения, подводимого к контрольному V_0 и поверяемому V вольтметрам (рис. 67), производится при помощи делителя напряжения D .

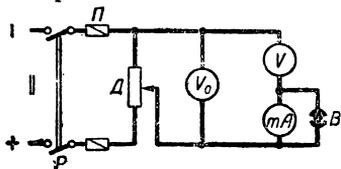


Рис. 67. Схема проверки вольтметра.

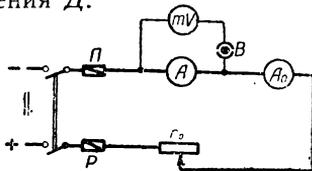


Рис. 68. Схема проверки амперметра.

При проверке вольтметра V миллиамперметр mA замыкается вилкой B накоротко (чтобы устранить его влияние) и вводится в его цепь только при измерении величины сопротивления обмотки вольтметра r_v .

Контрольный вольтметр V_0 при проверке на постоянном токе следует выбирать магнитоэлектрической системы более высокого класса точности, чем поверяемый прибор V .

Регулирование тока, протекающего по обмоткам контрольного A_0 и поверяемого A амперметров (рис. 68), производится при помощи регулировочного реостата r_p .

При проверке амперметра A милливольтметр mV должен быть отключен от него вилкой B , чтобы устранить его влияние на показания амперметра.

Милливольтметр mV приключается *только* для измерения падения напряжения на зажимах технического амперметра при полном отклонении его стрелки.

Контрольный амперметр при проверке на постоянном токе так же, как и вольтметр, должен быть магнитоэлектрической системы более высокого класса точности, чемверяемый амперметр.

В качестве источника питания обеих схем удобно использовать сеть, питающуюся от аккумуляторной батареи, которая обеспечивает неизменное напряжение.

Проведение опыта

Проверка вольтметра

1. Собрать схему, вставить закорачивающую вилку B в гнездо, поставить ползунок делителя D в положение, отвечающее наименьшему значению напряжения U , подводимого к вольтметрам, и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник P .

2. Передвигая ползунок делителя напряжения, добиться полного отклонения стрелкиверяемого вольтметра V , затем при этом режиме прогреть приборы током в течение 15 мин.

3. После прогрева выключить установку, регулировочными винтами установить обе стрелки приборов на нулевые деления шкал и приступить к проверке вольтметра.

4. При проверке постепенно повышать напряжение от нуля до значения, соответствующего полному отклонению стрелкиверяемого прибора, а затем при непрерывном понижении напряжения до нуля.

При производстве опыта следует, чтобы к моменту отсчета, который нужно производить одновременно по обоим приборам, стрелка *веряемого* вольтметра находилась строго против деления его шкалы.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Показания вольтметров, в	
	технического U	контрольного U_0
1	0	0
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

5. Вынуть вилку B из гнезда, установить ползунком делителя D такое напряжение, при котором стрелка поверяемого вольтметра V устанавливается на конечном делении шкалы, и записать показания приборов в таблицу.

№ опытов	Показания технического вольтметра U , в	Показание миллиамперметра I_B , ма
1		

6. Составить перечень аппаратуры, использованной при опыте, с приведением всех ее технических данных.

Поверка амперметра

1. Собрать схему, вынуть закорачивающую вилку B из гнезда, поставить ползунок регулировочного реостата r_p в положение, отвечающее его наибольшему сопротивлению, и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник P .

2. Медленно передвигая ползунок регулировочного реостата, добиться полного отклонения стрелки поверяемого амперметра A , затем в течение 15 мин. прогреть приборы током.

3. После прогрева выключить установку, регулировочными винтами установить обе стрелки на нулевые деления шкал и приступить к поверке амперметра.

4. Результаты поверки свести в таблицу.

№ опытов	Показания амперметров, а	
	технического I	контрольного I_0
1	0	0
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

5. Вставить закорачивающую вилку B в гнездо, установить ползунком регулировочного реостата r_p такой ток, при котором стрелка поверяемого амперметра A установилась бы на конечном делении шкалы, и записать показания приборов в таблицу.

№ опытов	Показание технического амперметра I, a	Показание милливольтметра $U_a, мв$
1		

6. Составить перечень аппаратуры, использованной при проверке амперметра, с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех произведенных опытов абсолютные погрешности ΔU и ΔI и поправки к показаниям приборов ΔU_0 и ΔI_0 , результаты расчетов объединить с данными наблюдений в следующие таблицы.

№ опытов	Исследование технического вольтметра, v				№ опытов	Исследование технического амперметра, a			
	U	U_0	ΔU	ΔU_0		I	I_0	ΔI	ΔI_0
1					1				
2					2				
3					3				
4					4				
5					5				
6					6				
7					7				
8					8				
9					9				
10					10				

2. Построить в одной координатной системе зависимости $U_0 = f(U)$ и $\Delta U_0 = f(U)$, а в другой — $I_0 = f(I)$ и $\Delta I_0 = f(I)$ и по ним найти истинные значения напряжения U_n и тока I_n поверяемых приборов при полном отклонении их стрелок.

3. Определить наибольшие приведенные погрешности $\gamma'_{\text{прив}}$ и $\gamma''_{\text{прив}}$ поверяемых приборов и дать заключение о возможности их дальнейшей эксплуатации.

4. Вычислить величины сопротивлений обмоток $r_{\text{в}}$ и $r_{\text{а}}$ поверяемых вольтметра и амперметра, а также собственное потребление ими мощности $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{а}}$ при полном отклонении стрелок.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 139—141.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 274—278, 290—291.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 208—212.

Работа № 13

ПОВЕРКА СЧЕТЧИКА АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Изучить схему поверки счетчика однофазного тока по методу раздельных цепей напряжения и тока.
2. Найти действительную постоянную счетчика и его погрешности при различных нагрузках.
3. Определить чувствительность и отсутствие самохода у счетчика.
4. Произвести поверку работы счетного механизма.

Основные теоретические положения

Для измерения электрической энергии, расходуемой в цепях переменного тока, применяются электрические счетчики индукционной системы.

Величина израсходованной электроэнергии определяется разностью отсчетов по счетному механизму счетчика, произведенным в конце и в начале рассматриваемого периода.

Счетный механизм счетчика при помощи червячной передачи соединяется с осью, на которой сидит легкий алюминиевый диск. Последний, являющийся подвижным элементом счетчика, находится в воздушном зазоре магнитной системы, состоящей из ферромагнитных сердечников, собранных из электротехнической стали толщиной 0,35 мм и двух самостоятельных неподвижных обмоток.

Одна из обмоток, выполненная тонкой проволокой и имеющая большое число витков, приключается непосредственно к напря-

жению сети U , а другая, с малым числом витков толстой проволоки, включается последовательно с нагрузкой.

При протекании переменного тока по обмоткам возбуждаются магнитные потоки, из которых один пропорционален величине подведенного напряжения U , а второй — току нагрузки I .

Эти потоки, сдвинутые между собой по фазе и не совпадающие пространственно, создают общее магнитное поле, возбуждающее в подвижном алюминиевом диске вихревые токи, которые, взаимодействуя с бегущим магнитным полем, вовлекают диск во вращение.

Величина возникающего момента при этом определяется соотношением

$$M_{\text{в}} = k_1 UI \cos \varphi, \quad (1)$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей счетчика;

U — напряжение, подведенное к его параллельной обмотке;

I — ток, протекающий по последовательной обмотке счетчика;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности электроприемников.

Вихревые токи, возникающие во вращающемся диске, взаимодействуют с магнитными силовыми линиями постоянного подковообразного магнита, и обуславливают появление тормозного момента $M_{\text{т}}$, пропорционального скорости вращения диска, т. е.

$$M_{\text{т}} = k_2 n, \quad (2)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности;

n — число оборотов диска счетчика за единицу времени.

При равномерном вращении диска и достаточно большой скорости вращения, когда трением можно пренебречь, имеет место такое соотношение

$$M_{\text{в}} = M_{\text{т}}. \quad (3)$$

Подставив значения моментов из формул (1) и (2), получим

$$k_1 UI \cos \varphi = k_2 n, \quad (4)$$

откуда

$$UI \cos \varphi = C_0 n, \quad (5)$$

где C_0 — отношение постоянных коэффициентов k_2 и k_1 .

Из равенства (5) видно, что мощность

$$P = UI \cos \varphi \quad (6)$$

пропорциональна скорости вращения диска счетчика n , т.е.

$$P = C_0 n, \quad (7)$$

а расход электрической энергии W за время t , отсчитываемый счетным механизмом счетчика, будет

$$W = \int_0^t P dt = C_0 \int_0^t n dt = C_0 N, \quad (8)$$

где N — число оборотов диска счетчика за время t .

Величина

$$C_0 = \frac{W}{N} \quad (9)$$

называется действительной постоянной счетчика электрической энергии и представляет собой количество энергии, потребляемое электроприемниками за время одного полного оборота диска.

Наряду с действительной постоянной C_0 вводится понятие номинальной постоянной счетчика C , представляющей собой величину электроэнергии, зарегистрированную счетчиком за один оборот диска, которая устанавливается по паспортным данным счетчика.

Обычно на счетчике указано, скольким оборотам диска N' соответствует расход электрической энергии в 1 квт-ч.

Если 1 квт-ч соответствует N' оборотам диска, то номинальная постоянная счетчика, выраженная в *вт-сек/об* может быть определена так:

$$C = \frac{3600 \cdot 1000}{N'} . \quad (10)$$

При проверке электрических счетчиков относительная погрешность

$$\gamma_{\text{относ}} = \frac{W - W_0}{W_0} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где W_0 — действительное значение величины электрической энергии, израсходованное за некоторый промежуток времени t , определенное по показаниям образцовых приборов;

W — значение величины электрической энергии, определенное по показаниям поверяемого счетчика за тот же промежуток времени, подсчитанное по формуле

$$W = CN, \quad (12)$$

где N — целое число оборотов диска за то же время t .

Обычно для индукционных счетчиков однофазного тока второго класса, находящихся в эксплуатации и только что вышедших из ремонта, при активной нагрузке и изменении тока от 10 до 100% I_n допускается наибольшая относительная погрешность в зависимости от величины нагрузки от ± 2 до $\pm 2,5\%$.

Кроме наибольшей относительной погрешности, нормами предусмотрена также определенная величина чувствительности счетчика σ , т. е. отношение минимального тока I_{\min} , при котором диск начинает вращаться без остановки, к номинальному значению тока I_n , обозначенному на паспорте счетчика

$$\sigma = \frac{I_{\min}}{I_n} \cdot 100\% . \quad (13)$$

Указанная величина для счетчиков второго класса должна быть не более 1%, при номинальном значении напряжения, подведенного к параллельной обмотке.

В неправильно отрегулированных счетчиках при отсутствии нагрузки может наблюдаться вращение диска.

Это явление называется самоходом счетчика. Самоход не должен иметь место при напряжениях от 80 до 110% от номинального.

Описание схемы установки

Для поверки счетчика однофазного тока Wh при активной нагрузке по контрольным приборам: вольтметру V и амперметру A — собрать схему (рис. 69), обеспечивающую наличие двух независимых параллельных цепей, в одну из которых входит параллельная, а в другую — последовательная обмотка счетчика с регулируемой нагрузкой.

Параллельная обмотка питается через делитель напряжения D , а контрольный вольтметр V измеряет подведенное к ней напряжение.

В цепь последовательной обмотки включают контрольный амперметр A и последовательно соединенные проволочный и ламповый нагрузочные реостаты.

Первый r_p обеспечивает плавное изменение тока в цепи, а второй r_n — скачкообразное.

Чувствительность счетчика определяют по миллиамперметру mA , соединенным последовательно с высокоомным регулируемым сопротивлением r_p' . При всех остальных опытах они должны быть замкнуты однополюсным рубильником R_k *нако-ротко*.

Контрольные приборы желательно выбирать электродинамической системы, обеспечивающей наибольшую точность при измерениях на переменном токе.

Промежутки времени, соответствующие выбранным числам оборотов диска счетчика, измеряют при помощи пружинного или электрического секундомера.

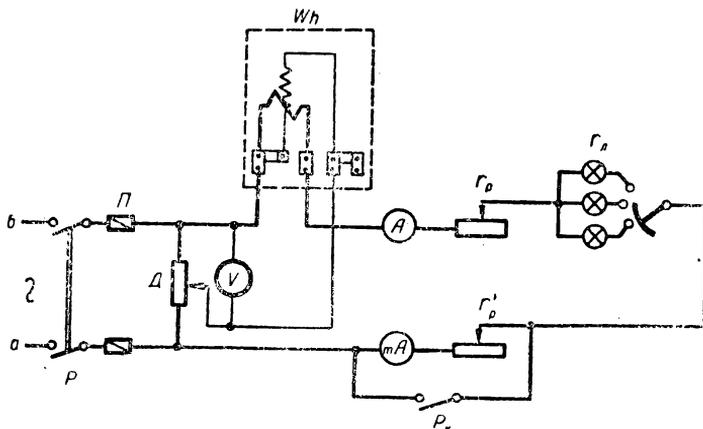


Рис. 69. Схема проверки счетчика активной энергии однофазного тока.

Проведение опыта

1. Собрать схему, ввести наибольшее значение сопротивлений r_p' , r_p , r_n , замкнуть однополюсный рубильник P_k накоротко и после проверки схемы руководителем включить двухполюсный рубильник P .

2. Прогреть обмотки счетчика в течение 15 мин. при номинальных напряжении и токе, записать начальное W_1 и конечное W_2 показания счетчика для последующей проверки счетного механизма, после чего приступить к испытанию счетчика при различных нагрузках.

3. Установить при помощи нагрузочных реостатов r_n и r_p ток в последовательной обмотке счетчика, равный 10, 30, 50, 70, 100 и 125% от номинального значения, указанного на паспорте счетчика при номинальном напряжении, и определить время, отвечающее целым числам оборотов диска счетчика при указанных нагрузках.

Желательно число отсчитываемых оборотов диска N выбрать кратным 20 так, чтобы соответствующее им время, отсчитываемое по секундомеру, t было не менее 50 сек.

Для каждой нагрузки опыт необходимо проделать дважды и за действительное время t взять среднее арифметическое двух отсчетов, полученных по секундомеру.

Данные опытов свести в таблицу.

№ опы- тов	Напряжение $U, в$	Ток $I, а$	Число оборотов диска N	Время $t, сек$	Нагрузка, %
1					10
2					10
3					30
4					30
5					50
6					50
7					70
8					70
9					100
10					100
11					125
12					125

4. Для определения чувствительности счетчика разомкнуть однопольный рубильник P_k (проверив, чтобы $r_p' = \max$), затем медленно уменьшать величину регулируемого сопротивления r_p' до тех пор, пока подвижная система не придет во вращение и диск без остановки сделает полный оборот.

Записать тот наименьший ток I_{min} , при котором диск будет вращаться без остановки.

5. Выключить переключателем лампового реостата всю нагрузку и делителем напряжения постепенно изменять напряжение от 80% U_n до тех пор, пока не начнется самоход счетчика. Записать то напряжение $U_{сам}$, при котором начинается вращение диска без остановок при отсутствии нагрузки.

6. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Вычислить по паспортным данным счетчика его номинальную постоянную C и дать заключение о правильности работы счетного механизма.

2. Учитывая, что действительный расход электроэнергии при напряжении U и токе I за время t определяется из формулы

$$W_0 = UI \cos \varphi \cdot t, \quad (14)$$

подсчитать для всех произведенных опытов величины действительной постоянной счетчика C_0 и относительную погрешность его показаний $\gamma_{\text{относ}}$, представив результаты расчетов в виде таблицы.

№ опытов	Данные наблюдений				Результаты вычислений				$\gamma_{\text{относ}}$, %	Примечания
	U , в	I , а	N , оборотов	t , сек.	P , вт	W_0 , вт-сек	W , вт-сек	C_0 вт-сек/об		
1—2										$I = 10\% I_H$
3—4										$I = 30\% I_H$
5—6										$I = 50\% I_H$
7—8										$I = 70\% I_H$
9—10										$I = 100\% I_H$
11—12										$I = 125\% I_H$

4. На основании данных приведенной таблицы составить графические зависимости $C_0 = f(I)$ и $\gamma_{\text{относ}} = f(I)$, подсчитать чувствительность счетчика σ и найти величину

$$u_{\text{сам}} = \frac{U_{\text{сам}}}{U_H} \cdot 100\%. \quad (15)$$

5. Дать заключение о пригодности исследуемого счетчика к дальнейшей эксплуатации.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 161—164.
 Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 318—320.
 Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 241—244.

Работа № 14

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА И АМПЕРМЕТРА

Цель работы

1. Изучить схемы для измерения «больших» и «малых» сопротивлений по методу вольтметра и амперметра.
2. Измерить сопротивление обмоток ваттметра.
3. Рассчитать мощность, потребляемую ваттметром при номинальной нагрузке.

Основные теоретические положения

В электротехнике под измерением сопротивления понимают опытное нахождение омического сопротивления r_x при измерении на постоянном токе.

Среди существующих способов измерения сопротивлений метод вольтметра и амперметра наиболее прост по применяемой аппаратуре и позволяет в отличие от других методов поставить исследуемое сопротивление в процессе измерения в *нормальные рабочие условия*.

Основан он на использовании закона Ома для участка цепи, являющегося измеряемым сопротивлением r_x .

Величина r_x определяется по известному падению напряжения на нем U_x и протекающему току I_x , как

$$r_x = \frac{U_x}{I_x}. \quad (1)$$

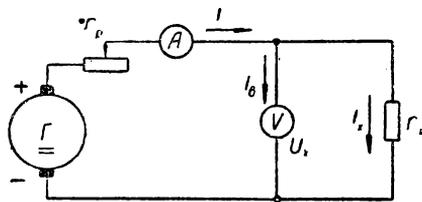


Рис. 70. Схема измерения сопротивлений с погрешностью вследствие влияния проводимости вольтметра.

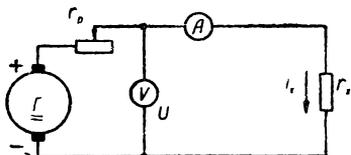


Рис. 71. Схема измерения сопротивлений с погрешностью вследствие влияния сопротивления амперметра (1-й вариант).

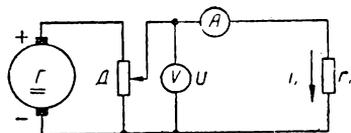


Рис. 72. Схема измерения сопротивлений с погрешностью вследствие влияния сопротивления амперметра (2-й вариант).

На рис. 70, 71, 72 представлены возможные способы измерения величины падения напряжения U_x на измеряемом сопротивлении r_x и протекающего по нему тока I_x .

Схемы, приведенные на рис. 71 и 72, идентичны и отличаются

только способом регулирования величины напряжения, подводимого к измеряемому сопротивлению r_x .

В схеме рис. 71 регулирование производится при помощи последовательно включенного с источником электрической энергии реостата r_p , а в схеме рис. 72 — делителем напряжения D , присоединенным параллельно к генератору.

Регулирование величины подводимого напряжения необходимо для возможности постановки измеряемого сопротивления в условия, близкие к нормальным эксплуатационным.

Сравнивая измерительные части приведенных схем, видим, что обе они полностью не могут обеспечить одновременно точное измерение необходимых величин U_x и I_x .

Действительно, в схеме, представленной на рис. 70, получается точное измерение величины падения напряжения на измеряемом сопротивлении и преувеличенное значение тока, так как через амперметр, кроме тока I_x , протекает еще ток I_b , потребляемый обмоткой вольтметра.

Величина измеряемого сопротивления в этом случае равна

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_b} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{r_b}}, \quad (2)$$

где r_b — сопротивление обмотки вольтметра.

В схемах, представленных на рис. 71 или 72, амперметр учитывает ток I_x , протекающий по измеряемому сопротивлению r_x , а вольтметр показывает сумму падений напряжений на измеряемом сопротивлении U_x и амперметре U_a .

Следовательно, величина измеряемого сопротивления в этом случае будет

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_a}{I_x} = \frac{U}{I_x} - \frac{U_a}{I_x} = \frac{U}{I_x} - r_a, \quad (3)$$

где r_a — сопротивление обмотки амперметра.

Таким образом, если при расчете величины неизвестного сопротивления r_x учитывать сопротивление электроизмерительных приборов: вольтметра r_b и амперметра r_a , то могут применяться обе схемы.

Если измеряемое сопротивление настолько мало по сравнению с сопротивлением обмотки вольтметра r_b , которое бывает обычно порядка тысячи или десятков тысяч ом , что в формуле (2) можно пренебречь током, ответвляющимся в вольтметр I_b , то его величину r_x находят как

$$r_x = \frac{U_x}{I}. \quad (4)$$

В тех случаях, когда измеряемое сопротивление по своей величине сравнимо с сопротивлением обмотки вольтметра r_b и пренебречь током I_b нельзя, следует пользоваться схемами, приведенными на рис. 71 или 72, и при расчете не учитывать малого падения напряжения на амперметре U_a .

Величина измеряемого сопротивления будет

$$r_x = \frac{U}{I_x}. \quad (5)$$

Обе формулы (4) и (5) дают определенную погрешность измерения, величина которой зависит от соотношения между сопротивлениями r_x , r_b и r_a .

Теоретические исследования показывают, что схема, изображенная на рис. 70, дает меньшую погрешность, когда измеряемое сопротивление

$$r_x < \sqrt{r_b r_a}, \quad (6)$$

а схемы, представленные на рис. 71 и 72, при

$$r_x > \sqrt{r_b r_a}. \quad (7)$$

Поэтому в практике первая схема называется схемой для измерения «малых» сопротивлений, а остальные — схемами для измерения «больших» сопротивлений.

Применив соответствующую схему и выбрав надлежащую измерительную аппаратуру магнитоэлектрической системы, характерную малым собственным потреблением энергии, получают результаты измерений, подсчитанные по формулам (4) и (5) с совершенно достаточной технической точностью.

Описание схемы установки

Так как измеряемыми величинами являются сопротивления последовательной и параллельной катушек ваттметра, то для производства опыта необходимо собрать две отдельные схемы.

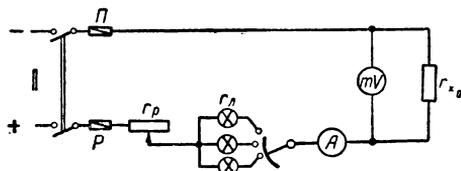


Рис. 73. Схема измерения сопротивления последовательной катушки ваттметра.

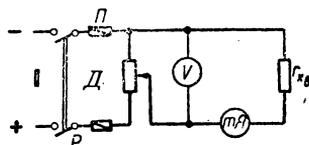


Рис. 74. Схема измерения сопротивления параллельной катушки ваттметра.

Схема для измерения сопротивления последовательной катушки ваттметра представлена на рис. 73.

В схеме предусмотрено два регулировочных реостата: ламповый r_d — для грубого регулирования и низкоомный проволочный с ползунком r_p — для более плавного регулирования тока в цепи I , а следовательно, и величины падения напряжения U_x на измеряемом сопротивлении r_x .

Схема для измерения сопротивления параллельной катушки ваттметра приведена на рис. 74.

В этой схеме изменение величины напряжения, подводимого к измеряемому сопротивлению r_x , производится делителем напряжения D , который представляет собой высокоомный проволочный реостат с ползунком.

Обе схемы питаются от источника постоянного тока.

Электроизмерительные приборы обычно выбирают магнито-электрической системы.

Проведение опыта

1. Собрать схему для измерения сопротивления последовательной обмотки ваттметра.

2. Выключить переключателем лампового реостата все лампы в реостате r_d , поставить ползунок проволочного реостата r_p в положение, отвечающее наибольшему сопротивлению и *после проверки схемы руководителем* замкнуть двухполюсный рубильник P .

3. Установить при помощи реостатов r_d и r_p ток в цепи, близкий к номинальному току последовательной обмотки ваттметра, после чего записать показания приборов.

4. Изменяя величину сопротивления проволочного реостата, устанавливать такие токи, при которых стрелка милливольтметра устанавливалась бы на определенные деления шкалы, и записывать показания приборов.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U_x, мв$	Ток $I, а$	Примечание
1			Номинальный ток последовательной обмотки ваттметра $I_n = a$
2			
3			

5. Собрать схему для измерения сопротивления параллельной обмотки ваттметра.

6. Поставить ползунок делителя напряжения D в положение, обеспечивающее наименьшее значение напряжения, подводимого к обмотке ваттметра, и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник P .

7. Перемещением ползунка делителя напряжения подвести к измеряемому сопротивлению r_d три напряжения, близкие к номинальному напряжению параллельной обмотки ваттметра, и записать показания приборов для каждого опыта в таблицу.

№ опытов	Напряжение U , в	Ток I_x , ма	Примечание
1			Номинальное напряжение параллельной обмотки ваттметра $U_H = \text{в}$
2			
3			

8. Составить перечень аппаратуры, использованной при проведении опытов, с приведением всех ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Подсчитать для всех опытов величины измеренных сопротивлений и за окончательные данные принять средние арифметические значения полученных результатов.

Результаты расчетов представить таблицей.

№ опытов	Последовательная обмотка ваттметра			Параллельная обмотка ваттметра		
	U_x , в	I , ма	r_{x_a} , ом	U , мв	I_x , а	r_{x_b} , ом
1						
2						
3						
	Среднее $r_a = \text{ом}$			Среднее $r_b = \text{ом}$		

2. Пользуясь полученными данными сопротивлений обмоток ваттметра и его номинальными значениями напряжения и тока, определить:

мощность, потребляемую при номинальном токе последовательной обмоткой ваттметра,

$$P_a = I_H^2 r_a; \quad (8)$$

мощность, потребляемую при номинальном напряжении параллельной обмоткой ваттметра,

$$P_b = \frac{U_H^2}{r_b}; \quad (9)$$

собственное потребление мощности ваттметром при номинальной его нагрузке

$$P = P_a + P_v. \quad (10)$$

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 13—14.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 297—299.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 232—234.

Работа № 15

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПО МЕТОДУ МОСТИКА

Цель работы

1. Изучить метод измерения сопротивлений при помощи мостика.

2. Измерить сопротивление нити лампы накаливания и определить ее температуру в рабочем состоянии.

Основные теоретические положения

Для измерения сопротивлений средней величины от 1 до 100 000 ом, находящихся вне рабочих цепей, может быть применен линейный мостик, принципиальная схема которого представлена на рис. 75.

Данный метод относится к так называемому нулевому методу и заключается в том, что путем изменения сопротивления образцового сопротивления r и перемещения подвижного контакта D устанавливают такой режим, при котором ток в диагональной ветви CD с гальванометром G равен нулю. Это возможно при равенстве падений напряжений на участках AC и AD , а также CB и DB , т. е. когда

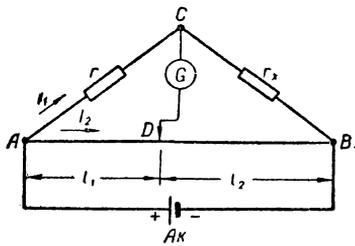


Рис. 75. Принципиальная схема линейного мостика для измерения сопротивлений.

$$I_1 r = I_2 \cdot \rho \frac{l_1}{s}, \quad (1)$$

$$I_1 r_x = I_2 \cdot \rho \frac{l_2}{s}, \quad (2)$$

где I_1 и I_2 — токи, протекающие по ветвям уравновешенного мостика;

ρ — удельное сопротивление калиброванной проволоки AB ;

l_1 и l_2 — длины плеч мостика при отсутствии тока в гальванометре G ;

r_x — величина измеряемого сопротивления;

r — величина известного образца сопротивления.

Разделив уравнение (1) на (2), получим

$$\frac{r}{r_x} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (3)$$

откуда величина измеряемого сопротивления

$$r_x = r \frac{l_2}{l_1}. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), равновесие мостика может быть достигнуто при различных комбинациях между величинами r , l_1 и l_2 .

Однако теоретические исследования показывают, что наилучшие результаты измерений получаются в тех случаях, когда

$$l_1 \cong l_2. \quad (5)$$

Поэтому при проведении измерений следует так устанавливать значение образцового сопротивления r , чтобы подвижный контакт D при равновесии мостика находился бы в средней части проволоки AB .

Описание схемы установки

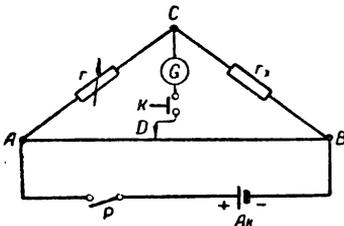


Рис. 76. Схема для измерения сопротивлений по методу мостика.

Для измерения сопротивления нити лампы накаливания r_x собрать установку, состоящую из магазина сопротивлений r , калиброванной проволоки AB , снабженной миллиметровой шкалой, по которой передвигается подвижный контакт D , и источник постоянного тока Ak (рис. 76).

Гальванометр с нулем посередине шкалы G в процессе измерения периодически *кратковременно* включается при помощи нажимной кнопки K до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие.

Проведение опыта

1. Собрать схему мостика, включив в качестве измеряемого сопротивления электрическую лампу накаливания с металлической нитью.

2. После проверки схемы руководителем замкнуть однополюсный рубильник P и приступить к измерению.

Для этого необходимо, изменяя величину образцового сопротивления r , перемещением подвижного контакта D найти в средней части линейки такое его положение, чтобы при кратковременном нажатии кнопки K стрелка гальванометра G оставалась неподвижной.

Результаты, полученные при достигнутом равновесии мостика, записать в таблицу.

№ опы- тов	Величина образцового сопротивления r, OM	Длины плеч при рав- новесии мостика, мм		Примечание
		l_1	l_2	
1				Номинальные дан- ные электрической лампы накалива- ния: напряжение $U_n = \epsilon$; мощность $P_n = \text{вт}$
2				
3				
4				

3. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опыта.

Обработка результатов испытания

1. Пользуясь данными наблюдений, рассчитать среднее значение сопротивления нити лампы в холодном состоянии r_x .

2. По номинальным данным электрической лампы накалива-
ния подсчитать ее сопротивление в накаливаемом состоянии

$$r_x' = \frac{U_n^2}{P_n}. \quad (6)$$

3. По формуле

$$r_x' = r_x [1 + \alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1)], \quad (7)$$

где α — средний температурный коэффициент, который для вольфрама может быть принят равным около 0,0046;

ϑ_1 — температура нити, при которой производилось изме-
рение, равная 20—25°.

Определить температуру нити в рабочем состоянии ϑ_2 .

Л и т е р а т у р а

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 15—17.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 49—53.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 29—30, 236—238.

Работа № 16

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ МЕГОММЕТРОМ

Цель работы

1. Изучить устройство мегомметра с логометром.
2. Проверить градуировку крайних делений мегомметра.
3. Измерить сопротивление изоляции проводов электрической линии.
4. Определить величину сопротивления изоляции обмоток электрических машин.

Основные теоретические положения

Исправная работа любой электротехнической установки может быть только при нормальном состоянии ее изоляции как между отдельными проводами, так и между токоведущими частями и землей.

Сопротивление изоляции проводов относится к разряду больших сопротивлений и отличается непостоянством, так как на него влияют: напряжение, влажность, температура и пр.

Поэтому большая точность при измерении сопротивления изоляции проводов не требуется, т. к. это совершенно бесполезно. Измерение сопротивления изоляции проводов производят обычно при помощи мегомметров.

Мегомметры имеют встроенный электромашинный источник постоянного тока, напряжением 500—2500 в, с ручным приводом и измерительный прибор, в качестве которого может быть использован магнитоэлектрический гальванометр с добавочным сопротивлением (в испытателе изоляции типа МПИ) либо магнитоэлектрический логометр с добавочными сопротивлениями (мегомметры типов МОМ-5, МС-06 и др.).

Испытатели изоляции с магнитоэлектрическим гальванометром неудобны, так как для того, чтобы получить необходимое напряжение постоянного тока, *влияющего на результат измерения*, надо во время измерения с определенной скоростью вращать ручку привода.

В мегомметрах с магнитоэлектрическими логометрами изме-

нение скорости в значительных пределах почти не влияет на результат измерения. Поэтому в настоящее время преимущественное распространение получили мегомметры с логометрами.

Логометр (рис. 77) представляет собой магнитоэлектрический прибор с двумя скрепленными вместе и сидящими на оси пересекающимися катушками 1 и 2, которые находятся в неравномерном магнитном поле подковообразного магнита.

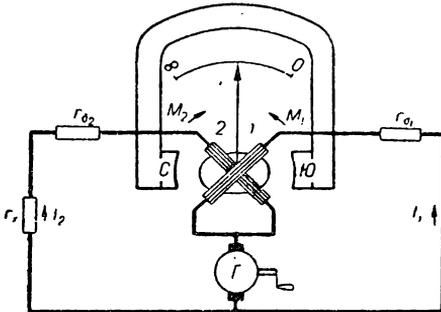


Рис. 77. Принципиальная схема мегомметра с логометром.

Отсутствие в приборе противодействующих пружин приводит к тому, что при обесточении подвижной системы последняя находится в безразличном равновесии и может занимать любое положение.

В цепи одной катушки находится постоянное сопротивление r_{d1} , а в цепи другой — некоторое постоянное сопротивление r_{d2} и измеряемое — r_x .

При вращении рукоятки привода генератора Γ по катушкам 1 и 2 потекут соответственно токи I_1 и I_2 , которые будут обратно пропорциональны величинам сопротивлений соответствующих параллельных цепей.

В результате взаимодействия токов I_1 и I_2 с магнитным полем постоянного магнита возникнут противоположно направленные моменты M_1 и M_2 , которые приведут подвижную систему в движение.

При некотором повороте катушек моменты M_1 и M_2 уравновесятся и стрелка прибора остановится на определенном делении шкалы.

Угол поворота подвижной системы зависит только от соотношений токов в катушках, т. е. от отношения сопротивлений их цепей, и не зависит от абсолютного значения величин I_1 и I_2 .

Следовательно, величина напряжения и скорость вращения привода не влияют на результат измерения.

Так как в рассматриваемой схеме переменной величиной может быть только измеряемое сопротивление r_x , то шкалу прибора можно проградуировать непосредственно в *МОМ*.

В нормально действующем мегомметре при вращении рукоятки привода и отсутствии тока в катушке 2 ($r_x = \infty$) стрелка прибора устанавливается на крайнее деление шкалы, около которого стоит знак ∞ .

При наибольшем токе в этой же катушке ($r_x = 0$) стрелка прибора находится на другом крайнем делении шкалы, отвечающем нулю.

Для того чтобы приблизить условия работы изоляции к эксплуатационным и одновременно выявить ее слабые места, обладающие недостаточной электрической прочностью, в мегомметрах применяют повышенное напряжение постоянного тока, обычно равное 500, 1000 или 2500 в.

Сопротивление изоляции проводов $r_{из}$, ом на любом участке электрической сети должно быть не меньше 1000 ом, умноженных на число вольт рабочего напряжения, т. е.

$$r_{из} \geq 1000 U_n, \quad (1)$$

а величина сопротивления изоляции между отдельными обмотками и корпусом электрической машины $r_{из}$ хотя правилами технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий и не нормируется, но заводы-изготовители указывают, что минимально допустимым ее значением после просушки при 60° и измерения мегомметром на 1000 в для электромашин с $U_n \leq 500$ в следует считать 0,5 мгом.

В холодной машине даже при увлажненной изоляции результаты измерения могут оказаться удовлетворительными из-за значительной зависимости величины $r_{из}$ от ее температуры.

Описание схемы мегомметра типа МОМ-5, 1000 в

Мегомметр типа МОМ-5 (рис. 78) предназначается для контроля состояния изоляции электрических цепей постоянным током напряжением 1000 в при температурах $-25 - 60^\circ$ и влажности до $95 \pm 5\%$.

В металлическом корпусе прибора находится генератор постоянного тока напряжением 1000 в, якорь которого через зубчатый редуктор приводится во вращение ручкой, выведенной на боковую сторону прибора. Центробежный регулятор обеспечивает постоянную скорость вращения якоря.

Для сглаживания пульсаций напряжения генератора предусмотрен конденсатор C , емкостью 0,05 мкф.

Для подключения измеряемого сопротивления на противоположной боковой стороне прибора находятся зажимы.

Встроенный в корпус измерительный прибор, собранный по логометрической схеме, имеет два добавочные сопротивления $r_{д1} = 200\,000$ ом и $r_{д2} = 100\,000$ ом, которые включены последовательно с обмотками 1 и 2.

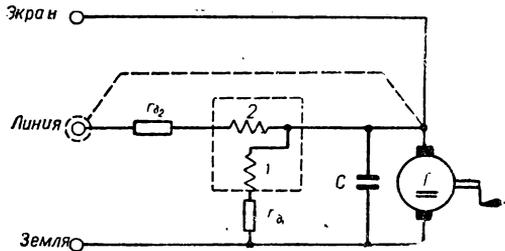


Рис. 78. Схема мегомметра типа МОМ-5, 1000 в.

Мегомметром можно измерять сопротивления между отдельными элементами электрического устройства, сопротивление изоляции между одним проводом линии и землей, а также сопротивление между двумя разомкнутыми проводами линии.

Перед измерением необходимо проверить правильность совпадения стрелки с делениями на шкале 0 и ∞ .

Для этого проводником закорачивают зажимы «линия» — «земля» и вращают ручку со скоростью 90—150 об/мин. При этом стрелка должна стоять на нулевом делении шкалы.

Аналогично при разомкнутых зажимах «линия» — «земля» проверяют совпадение стрелки с делением шкалы ∞ .

Во всех случаях измерения зажимы «линия» — «земля» должны быть присоединены к тем элементам электрической цепи, между которыми измеряют сопротивление.

Отсчет по шкале прибора производят при скорости вращения ручки привода генератора порядка 90—150 об/мин.

Вращать ручку со скоростью выше 150 об/мин не рекомендуется во избежание преждевременного износа механической части мегомметра.

При пользовании прибором необходимо следить за тем, чтобы электрические цепи, подвергающиеся измерению, были *обесточены*.

В противном случае прибор может быть поврежден или измерение произведено неверно.

Проведение опыта

Измерение сопротивления изоляции проводов относительно земли

1. Обесточить линию, подлежащую испытанию.
2. Проверить правильность установки стрелки прибора на делениях 0 и ∞ .
3. Присоединять поочередно испытываемые провода к зажиму «линия», а зажим «земля» к надежно заземленному проводнику и, вращая ручку прибора со скоростью $n = 90 — 150$ об/мин, производить отсчеты по шкале прибора.

При вращении ручки *нельзя* касаться зажимов прибора, а также присоединенных к ним проводов, так как разность потенциалов между ними доходит до 1000 в, что является *опасным для жизни*.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Величина сопротивления изоляции провода относительно земли $r_{из}$, МГОМ	Фаза
1		A
2		B
3		C
4		0

Измерение сопротивления изоляции обмоток статора электродвигателя трехфазного тока

1. Присоединить мегомметр зажимом «линия» к одной из обмоток статора, зажимом «земля» к корпусу машины, и измерить величину сопротивления обмотки относительно корпуса.

Проделать аналогичные измерения с двумя другими обмотками статора и результаты измерений записать в таблицу.

№ опы- тов	Величина сопротивления изоляции обмоток статора относительно корпуса $R_{из}$, МГОМ			Номинальные данные машины
	Фаза I	Фаза II	Фаза III	
1				$U_n = \text{в}$ $P_n = \text{квт}$

2. Измерить сопротивление изоляции между обмотками статора и результаты измерений представить таблицей.

№ опы- тов	Величина сопротивления изоляции между фазами статора $R_{из}$, МГОМ		
	Фазы I—II	Фазы II—III	Фазы III—I
1			

3. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опытов.

Обработка результатов испытания

1. Составить схемы включения мегомметра для измерения: сопротивления изоляции проводов относительно земли, сопротивления изоляции обмоток электрических машин относительно корпуса и относительно друг друга.

2. Считая рабочее напряжение линии 500 в, дать заключение о качестве изоляции исследованных проводов и о возможности введения их в эксплуатацию.

3. Дать заключение о качестве изоляции обмоток статора электродвигателя трехфазного тока и о возможности включения его в работу.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 164—166.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 299—301.

Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 234—236.

Работа № 17

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Цель работы

1. Ознакомиться с электрическим методом измерения температур.
2. Изучить устройство термометра сопротивления и термопары.
3. Произвести поверку градуировки логометра электротермометрической установки по контрольному ртутному термометру.

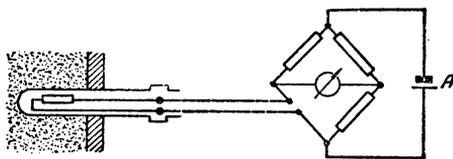


Рис. 79. Схема измерения температуры с электрическим термометром сопротивления.

Основные теоретические положения

На различных промышленных предприятиях часто предъявляют требования по обеспечению дистанционным измерением температур в различных точках, представляющих интерес для технологии процесса производства.

Это осуществляется приборами, заранее установленными в определенных точках и способными обеспечить передачу результатов измерения на расстояние.

К электрическим методам измерения температур относятся: метод электрического сопротивления и термоэлектрический.

На рис. 79 показана установка с термометром сопротивления, представляющего собой металлический корпус с наружной изоляционной оболочкой, поверх которой наложена обмотка из материала с большим температурным коэффициентом сопротивления α .

Сопротивление обмотки термометра сопротивления порядка 50—100 *ом*.

Материалом для изготовления обмоток служат чистые металлы, как-то: платина — для пределов измерения температур от -190 до $+660^\circ$; медь — для пределов измерения температуры от $+50$ до $+150^\circ$.

Такой термометр помещают в зону измеряемой температуры и соединительными проводами, идущими к щиту центрального контрольного пункта, присоединяют к измерительной схеме неуравновешенного моста, питающегося от аккумулятора *A*.

При изменении температуры происходит изменение электрического сопротивления термометра сопротивления, изменяется величина тока в диагональной ветви моста, который измеряется гальванометром со шкалой, проградуированной в градусах температуры.

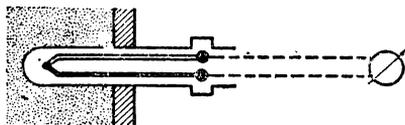


Рис. 80. Схема измерения температуры с помощью термопары.

Применение неуравновешенных мостов при использовании гальванометров требует поддержания неизменного напряжения источника питания. Так как это связано с определенными неудобствами, то в термометрических установках обычно используют логометры (рис. 77), угол отклонения стрелки которых зависит от величины измеряемого сопротивления и не зависит от изменения величины питающего напряжения на $\pm 20\%$ от его номинального значения, указанного на шкале логометра.

При термоэлектрическом методе измерения температуры применяют термопару, изготовленную из двух разнородных проводников, соединенных в одной точке и помещенных в защитную оболочку в зоне измеряемой температуры (рис. 80).

При подогреве места соединения проводников термопары возникает термо- э. д. с., обеспечивающая возникновение в измерительной цепи тока, протекающего через гальванометр, шкала которого проградуирована в градусах температуры.

При измерении температуры до 400° материалом для изготовления термопар служит медь — константан, до 600° — хромель — копель, до 1000° — хромель — алюмель и до 1300° — платина — платинородий.

В настоящей работе исследуется электротермометрическая установка, в которой датчиком, преобразующим температуру в электрические величины, является термометр сопротивления.

Описание схемы установки

Электротермометрическая установка (рис. 81) состоит из логометра типа ЛП_р - 55, предназначенного для дистанционного измерения температуры, в котором сопротивления $r_1, r_2, r_3, r_{вн} + r_{эл}$ образуют схему моста, а сопротивления r_4 и r_5 служат для температурной компенсации. Рамки логометра I и II включены в диагональную ветвь моста.

Питание логометра напряжением U осуществляется от сети постоянного тока через делитель напряжения D .

Средой с определяемой температурой является масло, находящееся в сосуде, установленном на электронагревательном приборе r_n .

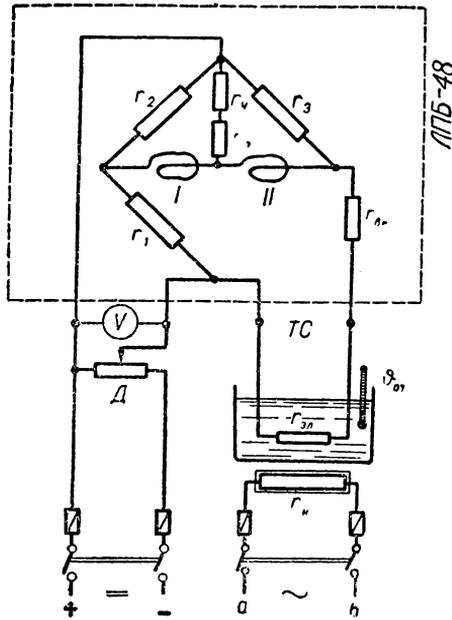


Рис. 81. Схема проверки градуировки логометра электротермометрической установки.

Температура масла контролируется ртутным термометром $\vartheta_{рт.$

Проведение опыта

1. Собрать схему установки, присоединив концы термометра сопротивления $r_{эл}$ к клеммам логометра $ТС$, а другие клеммы логометра соединить с концами, идущими от делителя напряжения $Д$.

2. После проверки схемы руководителем включить постоянный ток, подать логометру напряжение, установив его номинальное значение делителем напряжения.

3. Проверить положение шарика контрольного ртутного термометра, который должен находиться в подогреваемом масле, после чего включить электронагревательный прибор и через каждые 5 — 10 мин. записывать показания логометра и термометра до достижения маслом температуры не выше 70° .

4. Снизить величину питающего напряжения постоянного тока на 20% от номинального, записать отсчет по логометру, после чего восстановить напряжение до прежнего значения.

5. Отключить электронагревательный прибор от сети переменного тока и вести аналогичные наблюдения при снижении температуры охлаждающего масла.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Показания, град.	
	логометра	контрольного термометра
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		

6. Составить перечень использованной при опыте аппаратуры с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Составить график зависимости показаний логометра $\vartheta_{эл}$ от показаний ртутного термометра $\vartheta_{р-т}$, т. е. $\vartheta_{эл} = f(\vartheta_{р-т})$.

2. Указать на влияние изменения величины питающего напряжения на правильность показаний логометра термометрической установки.

3. Отметить преимущества и недостатки электротермометрической установки.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 148—150, 167.

Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, ГЭИ, 1953, стр. 43—60, 122—129, 136—146.

Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, ГЭИ, 1954, стр. 33—36, 209—221.

Работа № 18

ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНДУКТИВНЫМ ДАТЧИКОМ

Цель работы

1. Ознакомиться с электрическим методом измерения линейных перемещений.

2. Изучить конструкции индуктивных датчиков.

3. Определить цену деления измерительного прибора в пределах пропорциональной зависимости его показаний от величины линейных перемещений.

Основные теоретические положения

Дистанционные измерения линейных перемещений различных объектов могут быть легко осуществлены бесконтактным путем с помощью индуктивных датчиков.

Действие последних основано на зависимости их индуктивности от размеров и взаимоположения отдельных участков магнитопровода.

Индуктивный датчик с разомкнутой магнитной цепью, у которого

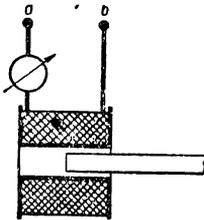


Рис. 82. Устройство индуктивного датчика с разомкнутой магнитной цепью.

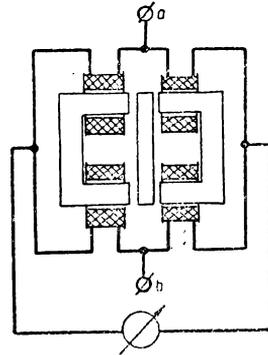


Рис. 83. Устройство дифференциального индуктивного датчика.

перемещение сердечника вызывает значительное изменение величины индуктивности катушки, приведен на рис. 82.

Для измерения линейного перемещения какой-либо детали необходимо ее перемещения сообщить сердечнику индуктивного датчика, обмотка которого подключена к зажимам $a-b$ сети переменного тока через измерительный прибор, показания которого являются функцией измеряемых линейных перемещений.

Индуктивные датчики могут быть дифференциальными с четырьмя катушками, сидящими на стальных сердечниках, между которыми находится якорь, соединенный с перемещаемой деталью.

К зажимам $a-b$ подводится переменный ток, а в другую диагональную ветвь моста включается измерительный прибор (рис. 83).

В среднем положении якоря мост, составленный из катушек, будет уравновешенным и ток, проходящий через измерительный прибор, равен нулю.

При смещении якоря из среднего положения величина индуктивности катушек изменяется, равновесие моста нарушается, че-

рез измерительный прибор начинает течь ток, вызывая отклонение его стрелки.

Шкала прибора обычно проградуирована в единицах перемещения исследуемой детали.

Описание схемы установки

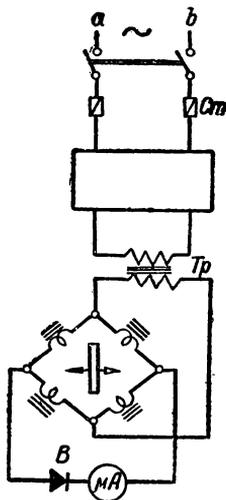


Рис. 84. Схема исследования индуктивного датчика линейных перемещений.

Экспериментальная установка состоит из индуктивного датчика дифференциального типа, питающегося через феррорезонансный стабилизатор напряжения *St* и понижающий трансформатор *Tr* (рис. 84).

В качестве измерительного прибора использован микроамперметр магнитоэлектрической системы, который питается через полупроводниковый выпрямитель *B*.

Перемещения якорю задаются при помощи винта микрометра, который жестко закреплен с индукционным датчиком на опорной плите.

Проведение опыта

1. Собрать экспериментальную установку и после проверки схемы руководителем включить рубильник переменного тока.
2. Вращать микрометрический винт микрометра до соприкосновения его с тягой якоря датчика, после чего записать показание по микроамперметру.
3. Изменять перемещения якоря датчика вращением винта микрометра и записывать отсчеты в таблицу.

№ опытов	Отсчеты по	
	микрометру, мм	микроамперметру, мка
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		

Примечание. Величину перемещений необходимо изменять от нуля до максимума и снова до нуля.

4. Повторить опыт пункта 3 при сниженном напряжении.
5. Составить перечень аппаратуры, использованной при проведении опыта.

Обработка результатов испытания

1. Построить график зависимости отклонения стрелки микроамперметра от величины перемещения якоря индуктивного датчика, т. е. $I = f(\Delta)$.

2. Установить пределы изменения величины линейных перемещений якоря датчика, где соблюдается прямая пропорциональность между величинами I и Δ .

3. Определить цену деления микроамперметра (мм/деление) в пределах соблюдения прямой зависимости между его показаниями и величиной перемещения якоря датчика.

4. Высказать соображения о точности работы индуктивного датчика линейных перемещений при изменении величины питающего напряжения.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 167—170.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 252—256.

Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, ГЭИ, 1954, стр. 58—59, 140—141.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

РАЗДЕЛ 4

ТРАНСФОРМАТОРЫ И БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Работа № 19

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель установки

1. Ознакомиться с конструкцией трансформатора однофазного тока.
2. Определить коэффициент трансформации и величину напряжения короткого замыкания.
3. Построить характеристики трансформатора в функции вторичного тока.
4. Найти относительное изменение вторичного напряжения при номинальной активной нагрузке.

Основные теоретические положения

Трансформатор представляет собой статический электромагнитный аппарат и служит для преобразования в цепях переменного тока электрической энергии с одним соотношением напряжения и тока в электрическую энергию с другим соотношением этих же величин.

Он состоит из замкнутого ферромагнитного сердечника, собранного из трансформаторной стали, на котором расположены две обмотки, выполненные изолированным проводом.

Одна из обмоток трансформатора присоединяется к источнику

преобразуемого переменного тока и называется первичной, а другая, в которой наводится э. д. с. взаимной индукции, — вторичной.

Величину э. д. с., наводимой во вторичной обмотке, определяют из соотношения

$$E_2 = 4,44 \Phi_m f \omega_2, \quad (1)$$

где E_2 — эффективное значение э. д. с. вторичной обмотки, v ;

Φ_m — амплитуда магнитного потока в сердечнике трансформатора, $вб$;

f — частота тока, питающего первичную обмотку трансформатора, $гц$;

ω — число витков вторичной обмотки.

В том случае, когда э. д. с., наводимая во вторичной обмотке, больше напряжения U_1 , подведенного к первичной обмотке, трансформатор называют повышающим.

В противном случае, т. е. когда $E_2 < U_1$, трансформатор называют понижающим.

Если ко вторичной обмотке, сопротивление которой z_2 , присоединить нагрузку z , то во вторичной цепи потечет ток I_2 и на ее зажимах установится напряжение

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 z_2, \quad (2)$$

которое будет зависеть от величины и характера нагрузки.

Зависимость $U_2 = F(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$, где $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности электроприемника, называется внешней характеристикой трансформатора.

Эксплуатационные свойства трансформатора однофазного тока, работающего при переменной нагрузке, определяют графически зависимостями, показывающими изменение вторичного напряжения U_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и коэффициента полезного действия η в зависимости от тока вторичной цепи I_2 при постоянных значениях подводимого напряжения U_1 , частоты f и коэффициента мощности электроприемников $\cos \varphi_2$.

Указанные характеристики могут быть получены различными методами на основании экспериментальных данных.

Исследование свойств трансформаторов небольшой мощности, имеющих малый коэффициент полезного действия и потребляющих небольшую мощность, может быть проведено методом непосредственной нагрузки.

Для этого с первичной и вторичной сторон трансформатора устанавливают электроизмерительную аппаратуру и измеряют подводимое напряжение U_1 , ток I_1 , потребляемую мощность P_1 , а также вторичное напряжение U_2 , ток I_2 и отдаваемую мощность P_2 при переменной нагрузке, подключенной ко вторичной обмотке трансформатора.

В случае активной нагрузки во вторичной цепи можно измерять только величины U_2 и I_2 , так как отдаваемая мощность

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (3)$$

в этом случае определяется их произведением, ибо $\cos \varphi_2 = 1$.

Коэффициент мощности трансформатора $\cos \varphi_1$ может быть найден из соотношения

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}, \quad (4)$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (5)$$

Следует отметить, что такой прямой метод определения коэффициента полезного действия, требующий полной нагрузки трансформатора, дает *значительные ошибки*, так как небольшие погрешности в определении близких между собой подводимой и отдаваемой мощностей вызывает большое искажение действительного значения к. п. д.

Поэтому данный способ допустим исключительно для трансформаторов малой мощности, у которых имеет место значительная разность между подводимой и отдаваемой мощностями.

При трансформаторах средней и большой мощности коэффициент полезного действия следует определять исключительно косвенным путем по данным опытов холостого хода и короткого замыкания

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}, \quad (6)$$

где β — отношение заданной нагрузки трансформатора к номинальной;

S_n — номинальная мощность трансформатора, *квa*;

$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности электроприемников;

P_0 и P_k — мощности, потребляемые трансформатором соответственно при опыте холостого хода (при номинальном напряжении) и опыте короткого замыкания (при номинальном токе), *квт*.

Коэффициент β , входящий в формулу (6), может быть найден из соотношения

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}, \quad (7)$$

где I_2 — ток нагрузки вторичной обмотки трансформатора, *a*;
 I_{2n} — номинальный ток вторичной обмотки, *a*.

Помимо указанных характеристик трансформатора, характерными для него величинами являются также его коэффициент

трансформации κ , относительное значение тока холостого хода ΔI_0 и относительное номинальное изменение напряжения $\Delta U_{2н}$ при определенном виде нагрузки ($\cos \varphi_2 = \text{const}$), а также величина напряжения короткого замыкания u_κ .

Коэффициент трансформации κ определяется отношением подведенного номинального значения первичного напряжения U_1 к установившемуся вторичному U_{2_0} при холостом ходе трансформатора, т. е.

$$\kappa = \frac{U_1}{U_{2_0}}. \quad (8)$$

Относительное значение тока холостого хода находится как отношение тока холостого хода I_0 к номинальному току первичной обмотки $I_{1н}$, указанному на паспорте трансформатора, т. е.

$$\Delta I_0 = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Величина номинального относительного изменения вторичного напряжения $\Delta U_{2н}$ устанавливается отношением разности между значениями вторичных напряжений при холостом ходе трансформатора U_{2_0} и при его номинальной нагрузке $U_{2н}$ к первой величине, т. е.

$$\Delta U_{2н} = \frac{U_{2_0} - U_{2н}}{U_{2_0}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Напряжение короткого замыкания u_κ находится как отношение напряжения U_κ , подводимого к первичной обмотке трансформатора при опыте короткого замыкания, к номинальному первичному напряжению $U_{1н}$, т. е. из соотношения

$$u_\kappa = \frac{U_\kappa}{U_{1н}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

Указанные величины: κ , ΔI_0 , $\Delta U_{2н}$, u_κ так же, как и прочие характеристики, находятся на основании результатов, полученных при проведении опытного исследования трансформатора.

Описание схемы установки

Для измерения подводимого напряжения U_1 , тока I_1 и потребляемой мощности P_1 (рис. 85) со стороны первичной обмотки трансформатора А—Х предусмотрена соответствующая измерительная аппаратура.

Питание установки напряжения производится через регулируемый автотрансформатор ЛАТР, при помощи которого на про-

тяжении опыта поддерживается необходимое первичное напряжение U_1 .

Амперметром A_0 измеряют *только* ток холостого хода. При других опытах он должен быть *замкнут накоротко* при помощи штепсельной вилки B .

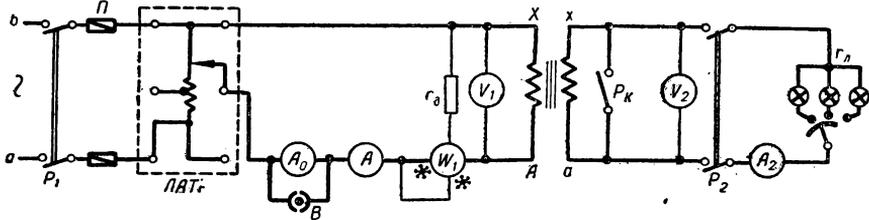


Рис. 85. Схема испытания трансформаторного однофазного тока.

Со стороны вторичной обмотки трансформатора $a-x$ вольтметром V_2 измеряют вторичное напряжение U_2 , а амперметром A_2 — ток нагрузки I_2 .

Нагрузка создается при помощи лампового реостата $r_{л}$.

При проведении опыта короткого замыкания вольтметр V_1 заменяют другим вольтметром на меньшие пределы измерений, величина добавочного сопротивления $r_{д}$ сводится к нулю, а однополюсный рубильник P_k замыкается накоротко.

Питание установки производится от сети однофазного перемещения тока промышленной частоты 50 гц .

Проведение опыта

1. Собрать схему для проведения испытания трансформатора однофазного тока в режиме холостого хода и при нагрузке.

2. После проверки схемы руководителем поставить ползунок регулировочного автотрансформатора ЛАТР в нулевое положение, разомкнуть рубильники во вторичной цепи P_2 и P_k и замкнуть двухполюсный рубильник P_1 .

Постепенным вращением рукоятки регулировочного автотрансформатора установить номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $A-X$ и, вынув на время измерения закорачивающую вилку B , записать показания всех приборов.

3. Вставить закорачивающую вилку B в штепсельное гнездо, а затем двухполюсным рубильником P_2 включить нагрузку $r_{л}$.

Изменяя число ламп в нагрузочном реостате $r_{л}$, испытать трансформатор при нагрузках $I_2 \cong 25, 50, 75, 100$ и 125% номинального вторичного тока.

Примечание. При проведении испытания трансформатора в нагрузочных режимах необходимо на зажимах его первичной обмотки все время поддерживать номинальное напряжение $U_{1н}$.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опы- тов	Первичная обмотка			Вторичная обмотка		Примечания
	Напря- жение $U_1, в$	Ток $I_1, а$	Мощ- ность $P_1, вт$	Напря- жение $U_2, в$	Ток $I_2, а$	
1					0	Холостой ход
2						Нагрузка ~ 25 %
3						Нагрузка ~ 50 %
4						Нагрузка ~ 75 %
5						Нагрузка ~ 100 %
6						Нагрузка ~ 125 %

4. Выключить двухполюсный рубильник P_1 , поставить ползунок регулировочного автотрансформатора ЛАТР в нулевое положение, заменить вольтметр V_1 другим вольтметром на меньшие пределы измерения, устранить добавочное сопротивление r_d , замкнуть однополюсный рубильник P_k и, *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник P_1 .

Медленно вращая рукоятку автотрансформатора, добиться установления номинального тока первичной обмотки испытуемого трансформатора, после чего произвести отсчеты по всем приборам.

Результаты опыта короткого замыкания записать в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U_k, в$	Ток $I_k, а$	Мощность $P_k, вт$
1			

5. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании трансформатора, и записать его паспорт.

Обработка результатов испытания

1. Вычислить коэффициент трансформации k , относительное значение тока холостого хода ΔI и напряжение короткого замыкания U_k .

2. Рассчитать для всех опытов коэффициент мощности трансформатора $\cos \varphi_1$ и его к. п. д. η (по формуле б), представив результаты наблюдений и вычислений в виде таблицы.

№ опы- тов	$U_1, \text{в}$	$I_1, \text{а}$	$P_1, \text{вт}$	$\cos \varphi_1$	$U_2, \text{в}$	$I_2, \text{а}$	$P_2, \text{вт}$	β	η	Приме- чание
1						0	0	0	0	Холостой ход Нагрузка
2										
3										
4										
5										
6										

3. Построить в одной координатной системе характеристики трансформатора при активной нагрузке в функции вторичного тока, т. е.

$$U_2 = F(I_2); \cos \varphi_1 = F(I_2); \eta = F(I_2) \text{ при } U_1 = \text{const и } \cos \varphi_2 = 1.$$

4. Найти относительное изменение вторичного напряжения $\Delta U_{2н}$ при номинальной активной нагрузке.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 171—183, 185—186, 189—192.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 331—353, 358—360, 366—368, 379—382.

Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 319—336, 339—342, 343—345.

Работа № 20

ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Ознакомиться с конструкцией трансформатора трехфазного тока.

2. Определить коэффициент трансформации и отношение линейных напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора при различных типах соединения обмоток.

3. Построить характеристики трансформатора в функции вторичного тока при равномерной нагрузке фаз.

4. Вычислить номинальный и годовой коэффициент полезного действия трансформатора.

Основные теоретические положения

Для преобразования в цепях трехфазного тока электрической энергии с одним соотношением линейных напряжений и токов в электрическую энергию с другим соотношением этих же величин применяются трансформаторы трехфазного тока.

Наибольшее распространение получили трехфазные стержневые трансформаторы с расположением стержней в одной плоскости.

На каждом из трех стержней, объединенных вверху и внизу своим ярмом, находятся первичная и вторичная обмотки одной и той же фазы.

Таким образом, трансформатор трехфазного тока имеет 12 концов.

Начальные выводы обмоток высшего напряжения (в. н.) обозначаются буквами A, B, C , а конечные — X, Y, Z .

Для обмоток низшего напряжения (н.н.) применяются аналогичные обозначения малыми буквами, т. е. a, b, c и x, y, z .

Как обмотки высшего, так и обмотки низшего напряжений могут быть соединены между собой звездой и треугольником.

При соединении звездой нейтральные точки обозначаются соответствующими буквами — O или o .

Таким образом, в трансформаторе трехфазного тока могут быть следующие типы соединения обмоток: $Y/Y, \Delta/Y, Y/\Delta, \Delta/\Delta$.

Коэффициент трансформации трансформатора трехфазного тока определяют как отношение фазных напряжений, т. е.

$$\kappa = \frac{U_{\Phi_1}}{U_{\Phi_2}}. \quad (1)$$

Отношение линейных напряжений с первичной и вторичной сторон зависит от коэффициента трансформации и типа соединения обмоток между собой.

Если соединение обмоток выполнено по схемам Y/Y или Δ/Δ , то отношение линейных напряжений будет равно коэффициенту трансформации, т. е.

$$\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}} = \kappa. \quad (2)$$

При соединении их по схеме Δ/Y оно будет

$$\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}} = \frac{\kappa}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

а при соединении Y/Δ представится как

$$\frac{U_{\lambda_1}}{U_{\lambda_2}} = \kappa \sqrt{3}. \quad (4)$$

Рабочие свойства трансформатора трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз определяются его характеристиками $U_2 = F(I_2)$, $\cos \varphi_1 = F(I_2)$ и $\eta = F(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$, которые могут быть получены опытным путем. Коэффициент мощности трансформатора трехфазного тока $\cos \varphi_1$ находим из соотношения

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{л_1} I_{л_1}}, \quad (5)$$

где P_1 — мощность, потребляемая трансформатором, *вт*;
 $U_{л_1}$ — среднее арифметическое значение линейных напряжений с первичной стороны U_{12} , U_{23} , U_{31} , *в*;
 $I_{л_1}$ — среднее арифметическое значение линейных токов с первичной стороны I_1 , I_2 , I_3 , *а*.

Коэффициент полезного действия трансформатора трехфазного тока при любой нагрузке определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}, \quad (6)$$

где β — отношение заданной нагрузки трансформатора к номинальной;
 S_n — номинальная мощность трансформатора, *кВа*;
 $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности электроприемников;
 P_0 и P_k — мощности, потребляемые трансформатором соответственно, при опытах холостого хода и короткого замыкания, *кВт*.

Коэффициент β находим из соотношения

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad (7)$$

где I_2 — ток нагрузки вторичной обмотки трансформатора, *а*;
 $I_{2н}$ — номинальный ток вторичной обмотки, *а*.

Годовой коэффициент полезного действия находится из соотношения

$$\eta_{\text{год}} = \frac{W_2}{W_2 + W_0 + W_k}, \quad (8)$$

где W_2 — энергия, отданная трансформатором в течение одного года, *кВт-ч*;
 W_0 — энергия, отвечающая годовым потерям в стали, *кВт-ч*;
 W_k — энергия, соответствующая годовым потерям в меди, *кВт-ч*.

Последние величины могут быть найдены из выражений:

$$W_2 = \sum \beta S_n \cos \varphi_2 \cdot t, \quad (9)$$

$$W_0 = 8760 P_0, \quad (10)$$

$$W_k = \sum \beta^2 P_k t \quad (11)$$

при условии, что трансформатор включен в сеть в течение всего года (8760 час.)

Описание схемы установки

Для проведения испытания трансформатора трехфазного тока предусматривается аппаратура, измеряющая линейные напряжения и токи с первичной и вторичной сторон, а также величину подводимой мощности (рис. 86).

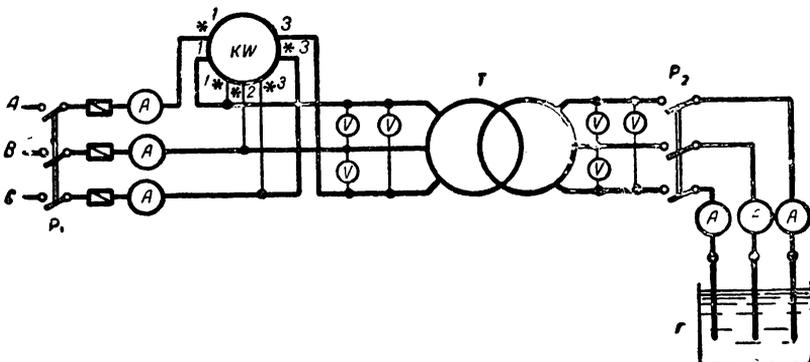


Рис. 86. Схема испытания трансформатора трехфазного тока.

Равномерная нагрузка фаз трансформатора со вторичной стороны создается при помощи жидкостного нагрузочного реостата r .

Питание установки производится от сети трехфазного тока A, B, C промышленной частоты 50 гц.

Проведение опыта

1. Собрать схему для испытания трансформатора трехфазного тока в режиме холостого хода и при нагрузке, соединив обмотки по схеме Y/Y_0 .

2. После проверки схемы руководителем, разомкнуть трехполюсный рубильник P_2 , включить трехполюсный рубильник P_1 и записать показания вольтметров.

Проделать то же при соединениях Δ/Y_0 , Y/Δ , Δ/Δ и результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опы- тов	Соединение обмоток трансформатора со стороны		Напряжения со стороны					
			первичной			вторичной		
	первичной	вторичной	$U_{12}, \text{ в}$	$U_{23}, \text{ в}$	$U_{31}, \text{ в}$	$u_{12}, \text{ в}$	$u_{23}, \text{ в}$	$u_{31}, \text{ в}$
1	Y	Y						
2	Δ	Y						
3	Y	Δ						
4	Δ	Δ						

3. Испытать трансформатор трехфазного тока в нагрузочном режиме при соединении обмоток по схеме Δ/Δ .

Для этого поднять и закрепить штангу нагрузочного реостата r в верхнем положении, включить трехполосный рубильник P_2 и записать показания всех приборов при нагрузках $I_{л2} \cong 25\%$, 50% , 75% , 100% и 125% номинального вторичного тока.

Примечание. Изменение величины нагрузки достигается различным погружением металлических пластин реостата в жидкость.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опы- тов	Первичная сторона							Вторичная сторона						Примечания
	Напряжения, в			Токи, а			Мощ- ность $P_1, \text{ квт}$	Напряжен., в			Токи, а			
	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3		u_{12}	u_{23}	u_{31}	i_1	i_2	i_3	
1											0	0	0	Холостой ход Нагрузка $\sim 25\%$ " $\sim 50\%$ " $\sim 75\%$ " $\sim 100\%$ " $\sim 125\%$
2														
3														
4														
5														
6														

4. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании трансформатора, и записать его паспорт.

Обработка результатов испытания

1. Вычислить коэффициент трансформации и отношение линейных напряжений с первичной и вторичной сторон трансформатора при соединении обмоток по схемам: $Y/Y - 12$, $\Delta/Y - 11$,

Y/ Δ — 11, Δ/Δ — 12, проверив этим справедливость соотношений (1), (2), (3), (4).

2. Рассчитать для всех произведенных опытов коэффициент мощности трансформатора $\cos \varphi_1$ и его к.п.д., результаты расчетов представить в виде таблицы.

№ опытов	$U_{л1}, \text{ в}$	$I_{л1}, \text{ а}$	$P_1, \text{ кВт}$	$\cos \varphi_1$	$U_{л2}, \text{ в}$	$I_{л2}, \text{ а}$	$P_2, \text{ кВт}$	β	η	Примечания
0						0	0	0	0	Холостой ход
1										нагрузка
2										
3										
4										
5										

3. Построить характеристики трансформатора в функции вторичного тока, т. е.

$$U_{л2} = F(I_{л2}), \cos \varphi_1 = F(I_{л2}), \eta = F(I_{л2}) \text{ при } \cos \varphi_2 = 1.$$

4. Определить номинальный и годовой к.п.д. трансформатора, если он работает в течение 2 месяцев с нагрузкой 100%, 8 месяцев с нагрузкой 50% и 3 месяца в режиме холостого хода.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 180—185, 189—192.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 350—360, 379—382.

Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 332—342.

Работа № 21

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы

1. Ознакомиться с методикой испытания асинхронного электродвигателя при помощи механического тормоза.

2. Построить по опытным данным механическую характеристику и рабочие кривые.

3. Определить номинальные величины, характеризующие работу электродвигателя.

Основные теоретические положения

Асинхронный электродвигатель трехфазного тока состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора.

Статор представляет собой полый цилиндр, собранный из листовой электротехнической стали, на внутренней поверхности которого имеются пазы, идущие параллельно оси вала.

В пазах размещены $3p$ одинаковых катушек, сдвинутых друг относительно друга на 120 электрических градусов, где p — число катушек на фазу, которое может быть равно любому целому числу.

Концы от каждой фазы, состоящей из p катушек, которые соединены между собой последовательно или параллельно, выводятся наружу. Это дает возможность соединять фазы между собой как треугольником, так и звездой.

Ротор также собран из дисков электротехнической стали. На наружной поверхности его имеются пазы, в которых находится короткозамкнутая обмотка ротора.

При присоединении обмоток статора к сети трехфазного тока по ним потекут токи и образуется вращающееся магнитное поле статора, скорость которого

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (1)$$

Это поле наводит в короткозамкнутой обмотке ротора э. д. с., под влиянием которых возникают индуктированные токи, взаимодействующие с вращающимся магнитным полем статора, в результате чего ротор приходит во вращение со скоростью

$$n_2 = n_1 (1 - s), \quad (2)$$

где s — величина скольжения, равная

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Рабочие свойства асинхронного электродвигателя характеризуются его механической характеристикой $n_2 = f(M)$, где M — полезный момент на валу машины, а также рабочими кривыми: $n_2 = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, $I = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, где P_2 — полезная мощность на валу электродвигателя.

Полезную мощность на валу P_2 можно определить методом механического торможения при помощи колодочного тормоза, надетого на полый шкив электродвигателя, который охлаждается проточной водой.

Охлаждение шкива водой устраняет возможность недопустимого перегрева колодок K' и K'' , трущихся о его поверхность (рис. 87).

Сила трения регулируется величиной подвешиваемого груза G на плече l и силой нажатия колодок K' и K'' при помощи гаек Γ . При вращении ротора со скоростью n_2 и горизонтальном положении рычага P тормоза момент, развиваемый электродвигателем на валу

$$M = 975 \frac{P_2}{n_2} \quad (4)$$

будет уравниваться моментом груза

$$M_T = Gl, \quad (5)$$

т. е.

$$975 \frac{P_2}{n_2} = Gl, \quad (6)$$

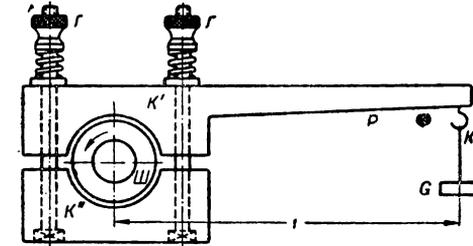


Рис. 87. Схема устройства колодочного тормоза.

откуда

$$P_2 = \frac{Gln_2}{975}, \quad (7)$$

где P_2 — мощность на валу электродвигателя, кВт;

G — вес подвешенного груза, кг;

l — плечо рычага тормоза, м;

n_2 — скорость вращения вала электродвигателя, измеренная тахометром, об/мин.

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ и коэффициент полезного действия η находятся по формулам:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} UI} \quad (8)$$

и

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (9)$$

где U и I соответственно — линейные напряжение и ток, P_1 — мощность, потребляемая обмоткой статора электродвигателя, Вт.

Описание схемы установки

В данной схеме (рис. 88) предусматривается электроизмерительная аппаратура для измерения линейного напряжения U , линейных токов I_1 и I_3 , а также потребляемой мощности P_1 , причем амперметры и последовательные обмотки киловаттметра включены через универсальные измерительные трансформаторы тока $ТТ$, имеющие вы-

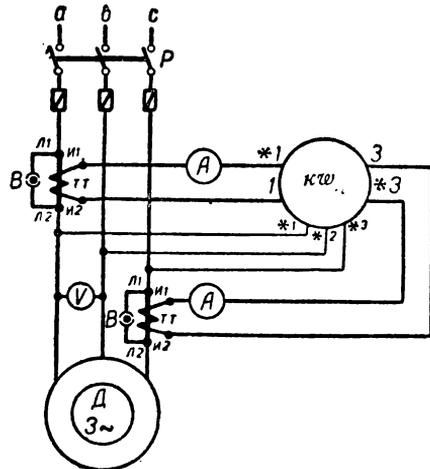


Рис. 88. Схема исследования асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором.

ки B для замыкания первичных обмоток $L1 — L2$ накоротко (рис. 8).

Изменение механической нагрузки производят при помощи колодочного тормоза с водяным охлаждением.

Скорость вращения измеряют тахометром.

Проведение опыта

1. Ознакомиться с данными паспорта асинхронного электродвигателя, определить величину напряжения в питающей сети и в соответствии с этим соединить обмотки машины треугольником или звездой.

2. Собрать схему для испытания асинхронного электродвигателя, снять колодочный тормоз со шкива, вставить плотно однополюсные вилки B универсальных трансформаторов тока в средние гнезда, а другие вилки установить в соответствующие гнезда, определяющие величину коэффициента трансформации.

3. После проверки схемы руководителем замкнуть трехполюсный рубильник P , поставить однополюсные вилки B в соседние холостые гнезда, произвести отсчеты по всем приборам и измерить скорость вращения ротора при холостом ходе электродвигателя.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Показания амперметров, a		Показание киловаттметра $P', квт$	Коэффициент трансформации k	Скорость вращения ротора $n_2, об/мин$
		I'_1	I'_3			
0						

4. Поставить однополюсные вилки B в средние положения, включить трехполюсный рубильник P , надеть на шкив колодочный тормоз и, не зажимая колодок, включить электродвигатель.

Если направление вращения ротора соответствует расположению плеча тормоза, приступить к испытанию электродвигателя под нагрузкой, в противном случае необходимо произвести реверсирование.

5. Подать в небольшом количестве охлаждающую воду к вращающемуся шкиву машины, подвесить наименьший груз G на конец рычага тормоза и, регулируя вращением гаек силу нажатия колодок на шкив, добиться равновесия.

В момент равновесия вынуть однополюсные вилки B из средних гнезд, произвести одновременный отсчет по всем приборам, измерить скорость вращения ротора и поставить вилки B в прежнее положение.

Проделать то же при грузах $\sim 2G, \sim 3G, \sim 4G$ и т. д. до тех

пор, пока ток электродвигателя не будет превышать номинальный ток на 20—25%.

Примечание. Наименьший груз ориентировочно находится так:

$$G = \frac{200 \cdot P_n}{n_{2n} l},$$

где G — наименьший груз, кг;

P_n — номинальная мощность электродвигателя, кВт;

n_{2n} — номинальная скорость вращения ротора, об/мин;

l — плечо рычага тормоза, м.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опы- тов	Вес груза G , кг	Длина плеча рычага тор- моза l , м	Напряжение U , в	Показания ампермет- ров, а		Показание киловаттметра P' , кВт	Коэффициент трансформа- ции k	Скорость вращения ротора n_2 , об/мин
				I_1	I_3			
1								
2								
3								
4								
5								
6								

7. Придерживая рукой рычаг тормоза, ослабить нажатие колодок, прекратить подачу охлаждающей воды, а затем выключить трехполюсный рубильник.

8. Составить перечень аппаратуры, использованной при исследовании асинхронного электродвигателя, и записать его паспорт.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех произведенных опытов следующие величины: вращающий момент M , скольжение s , мощность на валу P_2 , к. п. д. η , коэффициент мощности $\cos \varphi$ и средний потребляемый ток I .

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	G , кг	l , м	M , кгм	n_2 , об/мин	s , %	P_2 , кВт	η	U , в	I , а	P_1 , кВт	$\cos \varphi$
0	0		0			0	0				
1											
2											
3											
4											
5											
6											

2. Построить механическую характеристику асинхронного электродвигателя $n_2 = f(M)$.

3. Начертить в одной координатной системе рабочие кривые:

$$\begin{array}{lll} n_2 = f(P_2), & s = f(P_2), & M = f(P_2) \\ \eta = f(P_2), & I = f(P_2), & \text{и } \cos \varphi = f(P_2), \end{array}$$

из которых найти номинальные значения всех перечисленных величин, т. е. $n_{2н}$, s_n , M_n , η_n , I_n , $\cos \varphi_n$.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 197—203, 212—215, 221—223, 192—197.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 383—387, 397—399, 407—409, 419—421, 436, 368—372.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 348—361, 383—392, 397—405, 345—348.

Работа № 22

ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Цель работы

1. Изучить конструкцию асинхронной машины с контактными кольцами, определить коэффициент трансформации э. д. с., испытать электродвигатель по методу холостого хода и короткого замыкания.

2. Построить круговую диаграмму токов, механическую характеристику и рабочие кривые асинхронного электродвигателя.

3. Найти номинальные значения величин, характеризующих работу асинхронного электродвигателя по рабочим кривым.

Основные теоретические положения

В асинхронных машинах с контактными кольцами ротор имеет трехфазную обмотку, соединенную в большинстве случаев звездой, концы которой выводятся к трем контактными кольцам, сидящим на валу изолированной втулки.

На кольца накладываются щетки, к которым в случае использования машины в режиме электродвигателя присоединяется пусковой реостат, который уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент.

При присоединении обмоток статора к сети трехфазного тока по ним потекут токи, которые вызовут появление магнитного поля, вращающегося со скоростью

$$n_1 = \frac{60 f}{P}. \quad (1)$$

Это поле наводит в обмотках статора и ротора э. д. с.

$$E_1 = 4,44 \kappa_1 \Phi f \omega_1 \quad (2)$$

и

$$E_2 = 4,44 \kappa_2 \Phi f \omega_2, \quad (3)$$

где κ_1, κ_2 — коэффициенты обмоток соответственно статора и ротора;

Φ — магнитный поток, вб;

f — частота питающего тока, гц;

ω_1, ω_2 — число витков фаз соответственно статора и ротора.

При разомкнутой цепи ротора в его обмотках токи протекать не будут и машина, будучи неподвижной, окажется в режиме трансформатора трехфазного тока.

Коэффициент трансформации э. д. с.

$$\kappa = \frac{\kappa_1 \omega_1}{\kappa_2 \omega_2}. \quad (4)$$

При замыкании контактных колец через пусковые сопротивления, которые во время разбега машины должны постепенно выводиться, по обмоткам ротора потекут токи, в результате чего ротор начнет вращаться со скоростью

$$n_2 = \frac{60f}{p} (1 - s), \quad (5)$$

где p — число пар полюсов машины;

s — скольжение.

Для изучения свойств асинхронного электродвигателя трехфазного тока, работающего при переменной нагрузке, можно воспользоваться его механической характеристикой $n_2 = f(M)$, а также рабочими кривыми: $n_2 = f(P_2)$, $s = f(P_2)$, $I = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, где P_2 — полезная мощность на валу электродвигателя.

Эти зависимости можно получить и графоаналитическим методом, в основу которого положена круговая диаграмма.

Известно, что для асинхронных машин нормальной конструкции при изменении нагрузки конец вектора тока статора I описывает окружность, которой можно воспользоваться для построения вышеупомянутых характеристик машины.

Исходными данными для построения такой круговой диаграммы являются результаты, полученные при проведении опытов холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода, проводимом при номинальном напряжении U и номинальной частоте f , измеряются ток холостого хода I_0 и потребляемая мощность P_0 .

Коэффициент мощности при данном режиме

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U I_0}. \quad (6)$$

Опыт короткого замыкания производится при заторможенном роторе и сниженном напряжении на зажимах статора.

Величина напряжения U_k выбирается такой, чтобы ток, потребляемый обмоткой статора I'_k , был равен номинальному при соблюдении полной симметрии величины напряжения на зажимах статора.

При проведении этого опыта измеряется также мощность, потребляемая статором электродвигателя P'_k .

Так как для построения круговой диаграммы необходимо иметь данные, относящиеся к номинальному напряжению U , то результаты, полученные при опыте короткого замыкания, необходимо привести к последнему по формулам:

$$I_k = I'_k \frac{U}{U_k} \quad (7)$$

и

$$P_k = P'_k \left(\frac{U}{U_k} \right)^2. \quad (8)$$

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания будет

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U I_k}, \quad (9)$$

а эквивалентное сопротивление фазы статора-ротора, приведенное к статору,

$$r_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} I_k^2}. \quad (10)$$

Величина активного сопротивления фазы обмотки статора r_1 находится из соотношения

$$r_1 = \kappa_f r'_1, \quad (11)$$

где κ_f — коэффициент, учитывающий явление поверхностного эффекта, для обмоток статора, выполненных относительно тонким проводом, равный 1,04—1,10;

r'_1 — омическое сопротивление фазы статора в горячем состоянии, определяемое опытным путем.

Если по условиям опыта сопротивление r'_1 измерялось в холодном состоянии, то его следует привести к условной температуре $\vartheta_2 = 75^\circ$ и в формулу (11) вместо r'_1 ввести величину

$$r_1'' = r'_1 \frac{234,5 + \vartheta_2}{234,5 + \vartheta_1}, \quad (12)$$

где ϑ_1 — температура обмотки, при которой производилось измерение величины сопротивления, равная температуре окружающей среды.

Измерив сопротивление обмоток статора между его зажимами, определяют величину омического сопротивления r'_1 при соединении обмоток звездой

$$r'_1 = \frac{U}{2I}, \quad (13)$$

а при соединении треугольником

$$r'_1 = \frac{3U}{2I}, \quad (14)$$

где U и I — показания вольтметра и амперметра при измерении сопротивления обмоток статора на постоянном токе.

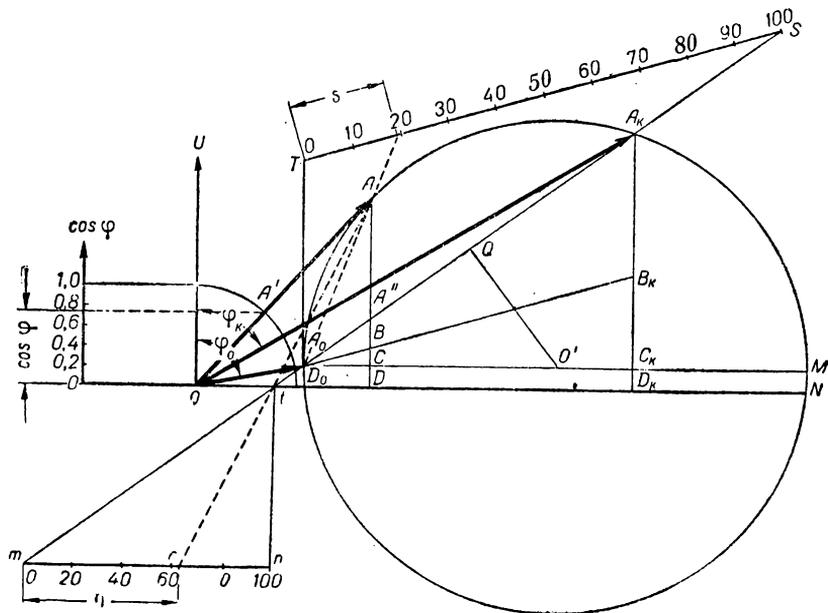


Рис. 89. Круговая диаграмма асинхронного электродвигателя трехфазного тока.

Построение упрощенной круговой диаграммы токов статора асинхронного электродвигателя трехфазного тока начинают с вычерчивания прямоугольной системы координат NOU , вертикальную ось которой OU принимают за направление вектора напряжения сети U (рис. 89).

От точки O системы координат NOU откладывают в масштабе $m_i \frac{a}{мм}$ токи холостого хода I_0 (вектор OA_0) и короткого замыкания I_k (вектор OA_k) под соответствующими углами ϕ_0 и ϕ_k по отношению к направлению вектора напряжения U .

Пересечение перпендикуляра QO' , восставленного из середины отрезка A_0A_k , с горизонталью A_0M дает точку O' — центр окружности, являющейся геометрическим местом концов вектора тока статора I , изменяющегося при переменной нагрузке электродвигателя.

Пользуясь полученной диаграммой, можно для любого значения тока статора I (вектор OA) найти целый ряд величин, характеризующих работу электродвигателя.

Действительно, так как при постоянном напряжении U активная мощность P_1 пропорциональна активному току, т. е.

$$P_1 \equiv I \cos \varphi, \quad (15)$$

который изображается отрезком AD , то мощность, потребляемая электродвигателем из сети P_1 , при любой нагрузке выражается в определенном масштабе длиной перпендикуляра, опущенного из конца соответствующего вектора тока I на ось ON .

Для определения численного значения подводимой мощности P_1 найдем ее масштаб m_p , $\frac{вт}{мм}$, который легко подсчитать из выражения

$$m_p = m_i \sqrt{3} U, \quad (16)$$

где m_i — масштаб тока, $\frac{а}{мм}$;

U — линейное напряжение сети, в.

Пренебрегая потерями на нагревание обмоток статора при холостом ходе, считаем, что мощность холостого хода, идущая на покрытие постоянных потерь,

$$P_0 \equiv I_0 \cos \varphi_0, \quad (17)$$

(где I_0 — ток холостого хода; $\cos \varphi_0$ — коэффициент мощности при холостом ходе) будет выражена в круговой диаграмме отрезком A_0D_0 .

Так как при коротком замыкании потребляемая мощность

$$P_k \equiv I_k \cos \varphi_k \quad (18)$$

(где I_k — ток короткого замыкания; $\cos \varphi_k$ — коэффициент мощности при коротком замыкании) идет на покрытие постоянных P_0 и переменных потерь в обмотках статора и ротора P_m , то в круговой диаграмме она представится отрезком A_kD_k , а тепловые потери отрезком A_kC_k

$$P_m = P_{m_1} + P_{m_2}, \quad (19)$$

где P_{m_1} и P_{m_2} — потери на нагревание соответственно обмоток статора и ротора.

Указанные потери P_{m_1} и P_{m_2} можно найти порознь, если отре-

зок $A_k C_k$ разделить на две части $A_k B_k$ и $B_k C_k$, определяемые из соотношения

$$\frac{B_k C_k}{A_k C_k} = \frac{r_1}{r_k}, \quad (20)$$

где r_1 — активное сопротивление фазы статора; r_k — приведенное к статору сопротивление фазы статора-ротора.

Если точку B_k соединить с точкой A_0 , то тогда для любого значения тока I , представленного вектором OA , потери в обмотке статора P_{m_1} будут изображаться отрезком BC , а потери в обмотке ротора P_{m_2} — отрезком $A''B$.

Для того чтобы найти величину скольжения s для любого режима, следует провести прямую TS , параллельную линии $A_0 B_k$, и отрезок, лежащий между линией $D_0 T \perp ON$ и продолжением прямой $A_0 A_k$, разделить на сто равных частей.

Линия, проведенная из точки A_0 через точку A , являющуюся концом вектора тока I , отсекает на линии TS отрезок s , являющийся мерой величины скольжения, отвечающего данному режиму.

Так как полезная мощность P_2 равна разности между мощностью, потребляемой из сети P_1 , и потерями в электродвигателе $P_0 + P_m$, то в круговой диаграмме она будет изображаться отрезком

$$AA'' = AD - A''D, \quad (21)$$

а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{AA''}{AD}. \quad (22)$$

Его легко найти графическим путем, если сделать в круговой диаграмме небольшое дополнительное построение.

Для этого следует продлить прямую $A_0 A_k$ и из точки ее пересечения t с горизонтальной осью ON провести вертикаль tn .

На любом расстоянии от оси ON следует провести горизонтальную линию mn и ее отрезок, заключенный между приведенной прямой tn и продолженной прямой $A_0 A_k$, и разделить на сто равных частей.

Тогда прямая Ar , проведенная через точку t и точку A , отвечающую данному току I , отсечет на отрезке mn величину коэффициента полезного действия η (отрезок mr).

Для нахождения коэффициента мощности $\cos \varphi$ из начала координат O проводят дугу радиусом 100 мм, которая будет пересекать вектор тока OA в точке A' .

Проекция отрезка OA' на вертикальную ось будет определять искомое значение $\cos \varphi$.

Таким образом, построенная круговая диаграмма дает возможность для любого значения тока статора I найти все интересные нас величины: P_1 , P_2 , s , η и $\cos \varphi$, которые можно пред-

ставить в виде соответствующих кривых, отображающих свойства асинхронного электродвигателя при переменной нагрузке.

Величина момента на валу асинхронного электродвигателя может быть найдена из соотношения

$$M = 975 \frac{P_2}{n_2}. \quad (23)$$

Для получения наиболее точных результатов при определении отдельных величин, характеризующих работу электродвигателя, необходимо масштаб для токов m_i выбирать таким, чтобы диаметр окружности круговой диаграммы был бы не меньше 200—300 мм.

Описание схемы установки

Измерение сопротивления обмоток статора и ротора асинхронного электродвигателя производится в холодном состоянии по методу вольтметра и амперметра (рис. 90). Регулировочный реостат r_p , позволяет измерять омическое сопротивление обмоток при различных значениях напряжения и тока. Питание установки производится от аккумуляторной батареи напряжением 4—6 в.

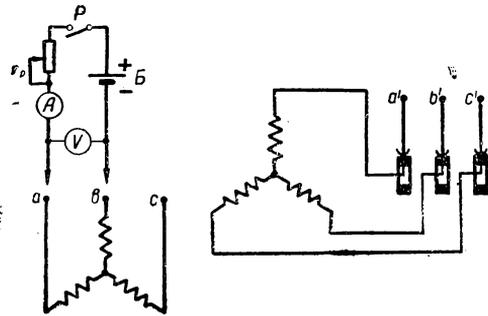


Рис. 90. Схема для измерения омического сопротивления обмоток статора и ротора асинхронного электродвигателя.

Измерение коэффициента трансформации э. д. с. производится при подключении обмоток статора к сети трехфазного тока и разомкнутой цепи ротора (рис. 91).

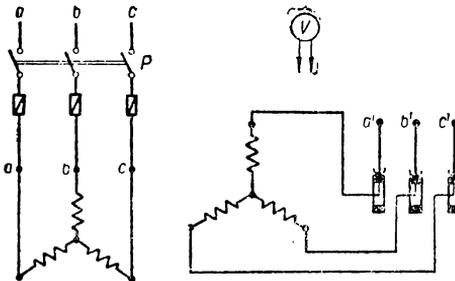


Рис. 91. Схема для измерения коэффициента трансформации э. д. с. асинхронной машины.

Разность потенциалов между зажимами обмоток статора и выводами ротора измеряется при помощи вольтметра со щупами.

В схеме для проведения опытов холостого хода и короткого замыкания питания обмоток статора асинхронного электродвигателя трехфазного тока осуществляется от сети a, b, c через регулировочные автотрансформаторы ЛАТР

(рис. 92). В цепи предусмотрена также аппаратура для изме-

рения линейных напряжений U_{12} , U_{23} , U_{31} , линейных токов I_1 , I_2 и потребляемой мощности P_1 .

Ввиду значительных токов амперметры и последовательные обмотки ваттметров включены через универсальные измерительные трансформаторы тока, которые имеют вилки B для замыкания первичных обмоток $L1 - L2$ накоротко (рис. 8).

В цепи ротора предусмотрен пусковой реостат r_n , замыкаемый накоротко при производстве испытаний.

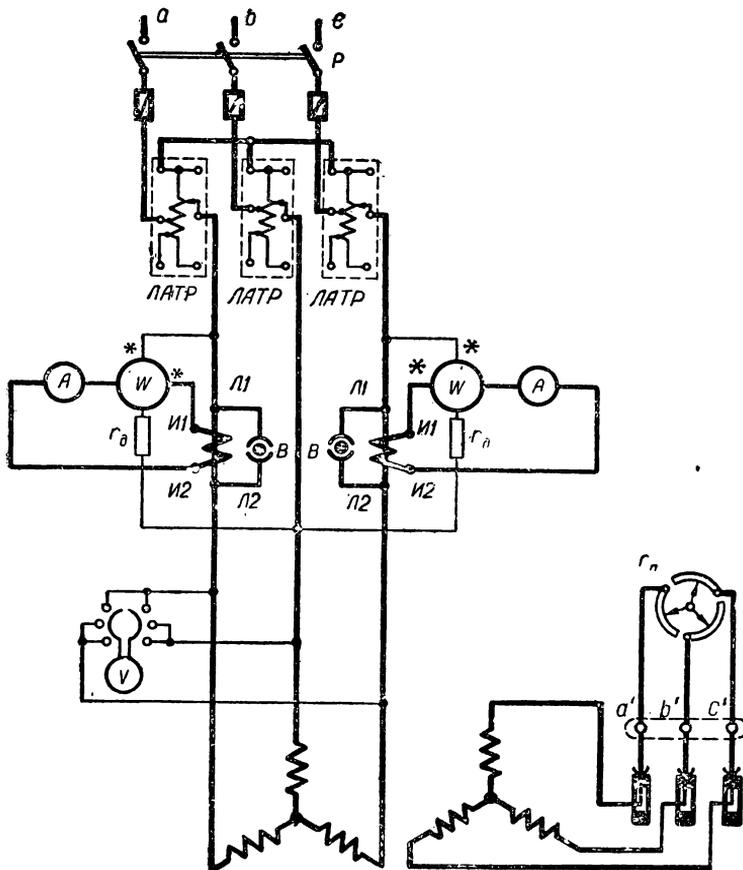


Рис. 92. Схема для проведения опытов холостого хода и короткого замыкания.

Термометр θ служит для измерения температуры окружающей среды.

Проведение опыта

1. Собрать схему для измерения омического сопротивления обмоток статора и произвести измерение между концами его фаз.

Результаты измерений свести в таблицу.

№ опытов	Измерение сопротивления между фазами	Напряжение $U, в$	Ток $I, а$
1	$a - b$		
2	$b - c$		
3	$c - a$		

2. Собрать схему для измерения коэффициента трансформации э. д. с., проверить разомкнутость цепи ротора, замкнуть трехполюсный рубильник P и, пользуясь вольтметром со щупами, измерить напряжение между концами фаз статора, а также между зажимами ротора.

Результаты измерений свести в таблицу.

№ опытов	Измерение напряжения между фазами	Напряжение $U, в$
1	$a - b$	
2	$b - c$	
3	$c - a$	
4	$a' - b'$	
5	$b' - c'$	
6	$c' - a'$	

3. Собрать схему для проведения опытов холостого хода и короткого замыкания, закоротить вилками B первичные обмотки $L1 - L2$ измерительных трансформаторов тока, поставить ручку пускового реостата r_n в положение «пуск», установить ручки регулировочных автотрансформаторов в положения, отвечающие номинальному напряжению электродвигателя, проверить правильность выбранного соединения обмоток статора (треугольник или звезда) и после проверки схемы руководителем замкнуть трехполюсный рубильник P .

Медленно и полностью вывести пусковой реостат в цепи ротора, установить симметричное номинальное напряжение на зажи-

мах статора, вынуть однополюсные вилки, закорачивающие B универсальных трансформаторов тока, и поставить их в соседние холостые гнезда.

Произвести *одновременный* отсчет по всем приборам и результаты измерений свести в таблицу.

№ опытов	Линейные напряжения, v			Показания амперметров, a		Показания ваттметров, $вт$		Коэффициент трансформации k
	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I'_1	I'_3	P'_{12}	P'_{32}	
1								

4. Выключить трехполюсный рубильник P , поставить ручки всех регулировочных автотрансформаторов в нулевые положения, *специальной* металлической планкой закоротить выводы ротора и приступить к проведению опыта короткого замыкания.

5. *Надежно* затормозив ротор электродвигателя, замкнуть трехполюсный рубильник P и *одновременным* вращением ручек трех автотрансформаторов добиться установления симметрии напряжений на зажимах статора при токах, близких к номинальному току машины, и результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Линейные напряжения, v			Показания амперметров, a		Показания ваттметров, $вт$		Коэффициент трансформации k
	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I'_1	I'_3	P'_{12}	P'_{32}	
1								

6. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами: и записать его паспорт.

Обработка результатов испытания

1. Привести данные опыта короткого замыкания к номинальному напряжению электродвигателя и определить коэффициент мощности при опытах холостого хода и короткого замыкания.

Данные расчетов представить таблицей.

№ опытов	$U, в$	$I, а$	$P_1, квт$	$\cos \varphi$	Примечания
1					Опыт холостого хода
2					Опыт короткого замыкания

2. Найти активное сопротивление фазы обмотки статора, а также эквивалентное сопротивление фазы статора-ротора, приведенное к статору, после чего построить круговую диаграмму токов асинхронного электродвигателя.

3. Определить из круговой диаграммы потребляемую мощность P_1 , отдаваемую мощность P_2 , к. п. д. η , коэффициент мощности $\cos \varphi$ и скольжение s для 6—8 значений токов, заключенных между I_0 и $1,5 I_n$, а также подсчитать скорость вращения ротора n_2 и величину момента на валу M .

Полученные результаты свести в таблицу.

№ опытов	I		P_1		P_2		η	$\cos \varphi$	s	$n, об/мин$
	<i>мм</i>	<i>а</i>	<i>мм</i>	<i>вт</i>	<i>мм</i>	<i>вт</i>				
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

4. Построить механическую характеристику асинхронного электродвигателя $n_2 = f(M)$.

5. Вычертить в одной координатной системе рабочие кривые: $n_2 = f(P_2)$; $s = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$; $I = f(P_2)$; $\cos \varphi = f(P_2)$ при $U = \text{const}$ и по ним найти номинальные значения всех перечисленных величин, т. е. $n_{2н}$, s_n , η_n , I_n , $\cos \varphi_n$.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 197—203, 216—217, 221—223, 192—197.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 383—387, 407—436, 368—372.

Бельский И. Р., Бесекиерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 348—361, 383—388, 392—394, 397—405, 345—348.

Работа № 23

УЛУЧШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА СТАТИЧЕСКИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Цель работы

1. Определить величину загрузки асинхронного электродвигателя стробоскопическим методом и измерить его коэффициент мощности.

2. Исследовать влияние величины компенсирующей емкости на ток, потребляемый установкой.

3. Построить резонансные кривые и векторные диаграммы асинхронного электродвигателя, компенсированного емкостью.

Основные теоретические положения

В асинхронных электродвигателях, работающих при нагрузке, не превышающей номинальную, полагают, что величина вращающегося момента M пропорциональна первой степени скольжения s , т. е.

$$M = ks. \quad (1)$$

Величина загрузки машины может быть определена как

$$\beta = \frac{M}{M_n} = \frac{s}{s_n} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 - n_{2н}}, \quad (2)$$

где M_n, s_n, n_{2n} — номинальные момент, скольжение и скорость вращения ротора, определяемые по паспортным данным электродвигателя;

M, s, n_2 — те же величины, отвечающие заданному режиму работы машины;

n_1 — скорость вращения магнитного поля статора, равная $\frac{60f}{p}$, где p — число пар полюсов машины.

Если известна скорость вращения ротора n_2 , соответствующая заданному режиму работы машины, то по формуле (2) можно легко определить величину загрузки электродвигателя.

Так как скорость n_2 мало отличается от номинальной n_{2n} , приведенной на паспорте, то измерение ее при помощи тахометра приводит к большим погрешностям при определении величины загрузки электродвигателя β .

Значительно лучшие результаты дает стробоскопический метод, позволяющий непосредственно измерять величину $n_1 - n_2$.

Для этого на вал асинхронного электродвигателя насаживается диск (рис. 93), разделенный попеременно на одинаковые белые и черные секторы, освещаемые лампой, которая питается током той же частоты, что и обмотки статора машины.

Такой лампой может быть любая маломощная лампа накаливания, хотя лучший эффект будет при газоразрядной, например, неоновой лампе, дающей две вспышки в течение одного периода.

Число черных (или белых) секторов берется равным числу полюсов машины $2p$.

При освещении такого диска вследствие стробоскопического эффекта наблюдается медленное его вращение против хода машины со скоростью $n_1 - n_2$ об/мин.

Определив кажущееся число оборотов Δn за время Δt сек., находят искомую разность $n_1 - n_2$ из соотношения

$$n_1 - n_2 = \frac{60 \Delta n}{\Delta t}, \quad (3)$$

затем по формуле (2) вычисляют загрузку электродвигателя, т. к. величины n_1 и n_{2n} известны из паспорта машины.

Работа асинхронного электродвигателя сопровождается потреблением из сети тока I , отстающего от напряжения U на угол φ , величина которого зависит от механической нагрузки на валу машины.

Последнее объясняется тем, что при переменной нагрузке на валу активная составляющая тока I_a изменяется почти прямо пропорционально ей, а реактивная составляющая I_p при переходе от режима холостого хода к номинальной нагрузке изменяется



Рис. 93. Стробоскопический диск для асинхронного электродвигателя $2p = 6$.

в электродвигателях открытого и защищенного типов только на 50%, а в закрытых машинах — на 20 — 25%.

Это приводит к тому, что в режиме холостого хода коэффициент мощности $\cos \varphi$ равен 0,1 — 0,25 и при номинальной нагрузке доходит до 0,70 — 0,93 в зависимости от номинальной мощности, быстроходности и конструктивного оформления машины.

На рис. 94 приведена кривая, показывающая изменение коэффициента мощности асинхронного электродвигателя при изменении нагрузки от нуля до 125% по отношению к номинальной мощности машины.

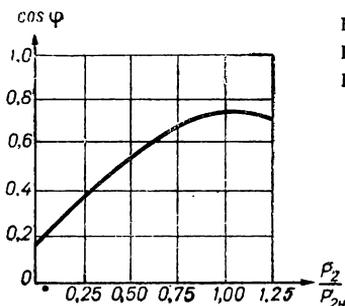


Рис. 94. Кривая измерения коэффициента мощности асинхронного электродвигателя в зависимости от его нагрузки на валу.

Повышение коэффициента мощности и компенсация реактивного намагничивающего тока в установке с асинхронным электродвигателем

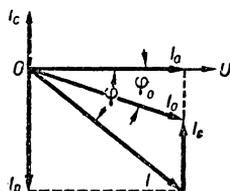


Рис. 95. Векторная диаграмма напряжения и токов асинхронного электродвигателя, компенсированного емкостью.

лем могут быть достигнуты путем параллельного приключения статических конденсаторов к зажимам статора машины.

Конденсаторная батарея, потребляя из сети реактивный емкостный ток I_c , который будет опережать напряжение U на 90° , вызовет полную или частичную компенсацию реактивного намагничивающего тока электродвигателя I_p , в результате чего общий ток, потребляемый установкой, уменьшится по сравнению с прежним его значением I и станет равным I_0 (рис. 95).

Общий ток при наличии параллельно приключенной емкости равен

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + (I_p - I_c)^2}, \quad (4)$$

а сдвиг его по фазе относительно напряжения U можно определить из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{I_p - I_c}{I_a}. \quad (5)$$

Практически величина угла сдвига фаз φ может быть определена по фазометру или вольтметру, амперметру и ваттметру трехфазного тока из формулы

$$\cos \varphi_0 = \frac{P}{\sqrt{3}UI_0}. \quad (6)$$

Анализируя выражение (4), можно прийти к выводу, что если

$$I_c < I_p, \quad (7)$$

то общий ток I_0 будет отстающим от напряжения U , а если

$$I_c > I_p, \quad (8)$$

то опережающим его.

Первый случай отвечает недокомпенсации реактивного намагничивающего тока электродвигателя, а второй — перекомпенсации.

В частном случае, когда

$$I_c = I_p, \quad (9)$$

установка будет работать с коэффициентом мощности $\cos \varphi_0$, равным единице, т. е. в цепи будет резонанс токов.

При этом ток, потребляемый установкой из сети, будет наименьший, равный активной составляющей тока электродвигателя, т. е.

$$I_0 = I_a. \quad (10)$$

Так как линейный ток трехфазной емкости, соединенной треугольником, определяется по формуле

$$I_c = \sqrt{3}U \cdot 2\pi fC, \quad (11)$$

то емкость одного плеча конденсаторной батареи C , мкф будет

$$C = \frac{I_c \cdot 10^6}{\sqrt{3}U \cdot 2\pi f}. \quad (12)$$

Описание схемы установки

Экспериментальная установка (рис. 96) состоит из асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором D , который через ременную передачу приводит во вращение вентилятор.

На валу ротора находится стробоскопический диск d , освещаемый неоновой лампой H .

Для повышения коэффициента мощности установки $\cos \varphi_0$ со стороны статора предусмотрена возможность подключения симметричной трехфазной переменной емкости C .

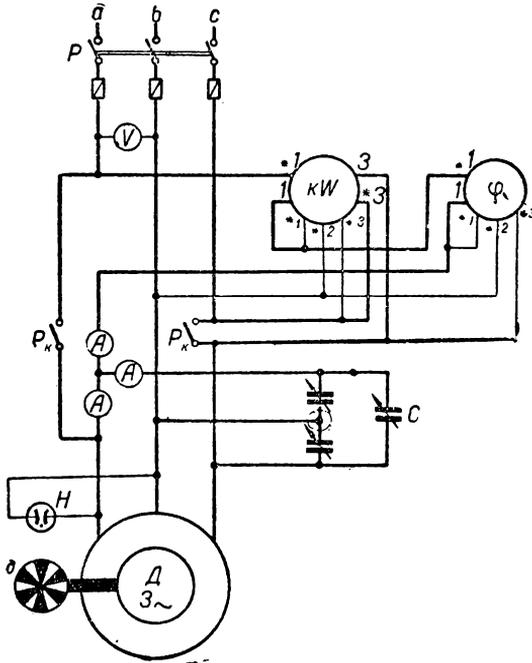


Рис. 96. Схема исследования компенсации сдвига фаз при помощи статических конденсаторов.

В схеме имеется необходимая электроизмерительная аппаратура, а также однополюсные рубильники P_k , служащие для предохранения ее от перегрузки пусковыми токами электродвигателя.

Питание установки осуществляется от сети трехфазного тока a, b, c промышленной частоты $f = 50$ гц.

Проведение опыта

1. Собрать схему исследования компенсации сдвига фаз при помощи статических конденсаторов.

2. Замкнуть однополюсные рубильники P_k накоротко, поставить ручки переключателей емкостей в нулевые положения и после проверки схемы руководителем замкнуть трехполюсный рубильник P .

Убедившись в правильном направлении вращения вентилятора, подсчитать время нескольких целых кажущихся оборотов

диска, сидящего на валу электродвигателя, и результаты наблюдений записать в таблицу.

№ опытов	Кажущееся число оборотов стробоскопического диска Δn , об.	Время Δt , сек.
1		

Примечание. Если направление вращения при пуске получилось не соответствующим нормальному направлению вращения вентилятора, то электродвигатель необходимо реверсировать.

3. Разомкнуть однополюсные рубильники P_k и записать показания всех приборов.

4. Включить одинаковую наименьшую емкость во всех фазах и снова записать результаты наблюдений.

Затем, постепенно увеличивая величину емкости во всех фазах, дойти до резонанса токов, перейти его и закончить опыты, когда общий ток будет примерно равен току электродвигателя.

Результаты экспериментирования представить таблицей.

№ опытов	Напряжение U , в	Ток, а			Потребляемая мощность P , <i>квт</i>	Коэффициент мощности по фазомеру $\cos\varphi_0$	Расчетные величины					
		общий I_0	электродвигателя I	конденсаторов I_c			коэффициент мощности установок $\cos\varphi_0$	емкость плеча конденсаторной батареи C , <i>мкф</i>				
1				0								
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

5. Составить перечень всей использованной аппаратуры и записать данные паспорта электродвигателя.

Обработка результатов испытания

1. Определить скорость вращения ротора асинхронного электродвигателя, величину его загрузки, коэффициент мощности и частоту тока в стержнях ротора.

Результаты расчетов представить таблицей.

№ опытов	Δn , об.	Δt , сек.	$n_1 - n_2$, об.	n_1 , об.	n_2 , об.	β	$\cos \varphi$	f_2 , гц
1								

2. Рассчитать для всех опытов коэффициент мощности установки $\cos \varphi_0$ и величину емкости одного плеча конденсаторной батареи, дополнив полученными результатами таблицу наблюдений.

3. Построить кривые $I_0 = f(C)$ и $\cos \varphi_0 = f(C)$, по которым найти значение емкости C_0 , отвечающее резонансу токов.

4. Вычертить в масштабе для первого и последнего опытов, а также для случая резонанса токов треугольники мощностей и векторные диаграммы напряжения и токов.

5. Высказать соображения о технико-экономических последствиях, связанных с повышением коэффициента мощности заводских установок при помощи статических конденсаторов.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 96, 221, 223.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 220—222, 443—445.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 162—166, 402—405.

Работа № 24

ИСПЫТАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Изучить конструкцию синхронной машины.
2. Снять характеристики: холостого хода, внешнюю и регулировочную.

3. Определить процентное повышение напряжения генератора при переходе от номинальной нагрузки к режиму холостого хода.

Основные теоретические положения

Синхронный генератор состоит из двух частей: статора и ротора.

Статор представляет собой полый цилиндр, набранный из листовой электротехнической стали. На внутренней его поверхности имеются пазы, в которых находится однофазная или трехфазная обмотка в зависимости от того, какой необходимо получить ток от генератора.

Генераторы однофазного тока изготавливаются обычно на небольшую мощность порядка нескольких *кВа*.

Ротор, находящийся внутри статора, имеет систему электромагнитов, обмотки которых питаются от независимой сети постоянного тока или от специальной машины постоянного тока, называемой возбудителем.

В отдельных случаях питание цепи ротора может быть произведено от цепей переменного тока через выпрямительные устройства.

Электромашинный возбудитель большей частью находится с синхронным генератором на одном валу и имеет мощность порядка 0,5—2% мощности синхронной машины.

При вращении ротора посторонним приводным двигателем его магнитное поле, возбужденное постоянным током, наводит в обмотке статора переменную синусоидальную э. д. с., эффективное значение которой

$$E = 4,44 \kappa \Phi f \omega, \quad (1)$$

где κ — коэффициент обмотки статора;

Φ — магнитный поток полюса ротора, *вб*;

f — частота генерируемой э. д. с., *гц*;

ω — число витков фазы статора.

Частота генерируемой э. д. с. находится в строгом соответствии со скоростью вращения ротора n и связана с ней соотношением

$$f = \frac{pn}{60}, \quad (2)$$

где p — число пар полюсов ротора.

Так как в обычных условиях работа синхронного генератора протекает при неизменной частоте, т. е. при $f = \text{const}$, то для определенной машины соотношение (1) может быть записано в следующем виде:

$$E = c\Phi, \quad (3)$$

где

$$c = 4,44 \kappa f \omega. \quad (4)$$

Из соотношения (3) следует, что величина э. д. с., наводимой в обмотке статора генератора при постоянной частоте f и холостом ходе зависит только от магнитного потока полюсов ротора Φ или от протекающего по его обмотке возбуждающего постоянного тока $I_{\text{в}}$.

Зависимость $E = F(I_{\text{в}})$, снятую при холостом ходе машины и постоянной скорости вращения n , называется характеристикой холостого хода, или магнитной характеристикой синхронного генератора.

При снятии ее ротор должен приводиться во вращение посторонним двигателем с неизменной скоростью вращения n , а ток возбуждения изменяться от наибольшего значения до нулевого, а затем повышаться до первоначального значения, что дает возможность получить нисходящую и восходящую ветви характеристики холостого хода, не совпадающие из-за явления магнитного гистерезиса.

Практически они мало отличаются друг от друга, так как разница в их ординатах обычно не превышает нескольких процентов от среднего значения генерируемой э. д. с.

Подключение к обмотке статора нагрузки вызывает появление нагрузочного тока, который создает свое поле, действующее на магнитное поле ротора (реакция якоря), в результате чего получается новое результирующее магнитное поле машины.

Это приводит к изменению величины генерируемой в обмотке статора э. д. с., что, в свою очередь, вызывает изменение напряжения генератора U , определяемого соотношением

$$\bar{U} = \bar{E} - \bar{I}z_0, \quad (5)$$

где I — нагрузочный ток, протекающий по обмотке статора;

z_0 — полное сопротивление фазы статорной обмотки.

Семейство кривых, показывающих зависимость изменения величины напряжения U от тока нагрузки I , при различных коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi$, неизменном токе возбуждения $I_{\text{в}}$ и постоянной скорости вращения ротора n представляет собой внешние характеристики машины.

Внешние характеристики $U = F(I)$ при активной и индуктивной нагрузках изображаются убывающими кривыми, а при емкостной — возрастающими.

Для характеристики изменения величины напряжения синхронного генератора при переменной нагрузке и определенном коэффициенте мощности электроприемников $\cos \varphi$ принято находить

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где ΔU — относительное изменение величины напряжения, происходящее в генераторе при переходе от номинальной нагрузки к режиму холостого хода, (в %);

U_0 и U_n — соответственно напряжение при холостом ходе генератора и его номинальное напряжение.

Для обеспечения постоянного напряжения U при переменной нагрузке необходимо регулировать ток возбуждения I_B .

В случае возрастающей активной или индуктивной нагрузки приходится увеличивать ток возбуждения, а при емкостной нагрузке — уменьшать.

Кривые типа $I_B = F(I)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$ называют регулировочными характеристиками синхронного генератора, они показывают, как следует изменять ток в цепи ротора I_B при постоянной скорости вращения n для того, чтобы обеспечить стабильное напряжение U машины при переменной разнохарактерной нагрузке.

Описание схемы установки

Установка (рис. 97) состоит из синхронного генератора однофазного тока Γ и приводного электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения Δ .

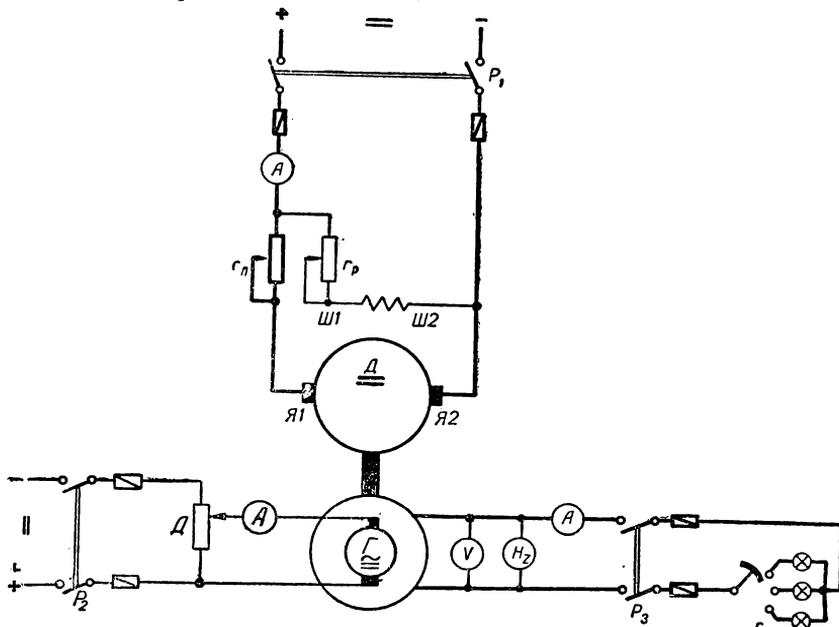


Рис. 97. Схема испытания синхронного генератора однофазного тока.

Цепь ротора синхронного генератора питается от посторонней сети постоянного тока через делитель напряжения Δ .

Нагрузка на генератор создается при помощи лампового реостата r .

В цепях статора и ротора синхронного генератора предусмотрена соответствующая электроизмерительная аппаратура.

В цепях приводного электродвигателя находятся два реостата: пускорегулировочный r_n и регулировочный r_p , при помощи которых осуществляется пуск агрегата и регулирование его скорости вращения.

Скорость вращения контролируется по показаниям частотомера, включенного в цепь статора синхронного генератора.

Проведение опыта

1. Собрать схему для испытания синхронного генератора однофазного тока.

2. Поставить ползунки пускорегулировочного r_n и регулировочного r_p реостатов приводного электродвигателя постоянного тока в пусковые положения и *после проверки схемы руководителем* замкнуть двухполюсный рубильник P_1 .

3. Включить двухполюсный рубильник P_2 , подать делителем напряжения D постоянный ток в цепь ротора, установить и поддерживать на протяжении всего опыта при помощи реостатов r_n и r_p такую скорость вращения генератора, при которой частота генерируемых колебаний была бы номинальной.

4. Приступить к снятию характеристики холостого хода синхронного генератора.

Для этого установить делителем напряжения D такой ток возбуждения, при котором э. д. с. генератора будет на 20—25% выше номинального напряжения машины, а затем постепенно уменьшать ток возбуждения до нулевого значения, отмечая для различных значений токов соответствующие значения э. д. с.

Результаты опытов представить таблицей.

№ опытов	Э.д.с. генератора E , в	Частота f , гц	Ток возбуждения I_B , а
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

5. Приступить к снятию внешней характеристики при активной нагрузке.

Для этого возбудить синхронный генератор до напряжения,

превышающего номинальное на 20—25%, включить двухполюсным рубильником P_3 нагрузку и, регулируя число включенных ламп в нагрузочном реостате, установить такой режим, при котором генератор отдавал бы номинальный ток при номинальном напряжении и номинальной частоте.

В дальнейшем ползунок делителя напряжения не трогать!

6. Выключить все лампы в нагрузочном реостате r , после чего отрегулировать номинальную скорость вращения агрегата и записать показания всех приборов.

Затем включением различного числа ламп в нагрузочном реостате устанавливать нагрузку генератора, близкую к 25, 50, 75, 100 и 125% по отношению к номинальной, записывая каждый раз отсчеты по приборам в таблицу.

№. опытов	Напряжение генератора $U, в$	Частота $f, гц$	Ток, a	
			нагрузки I	возбуждения I_B
1			0	
2				
3				
4				
5				
6				

7. Снять регулировочную характеристику синхронного генератора. Для этого отключить нагрузку, отрегулировать номинальные напряжения и частоту в режиме холостого хода и записать, какой при этом будет ток возбуждения.

Далее нагружать генератор токами, близкими к 25, 50, 75, 100 и 125% номинального тока машины, и устанавливать каждый раз такой ток возбуждения, при котором напряжение генератора оставалось бы неизменным при номинальной частоте.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение генератора $U, в$	Частота $f, гц$	Ток, a	
			нагрузки I	возбуждения I_B
1			0	
2				
3				
4				
5				
6				

8. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании синхронного генератора однофазного тока.

Обработка результатов испытания

1. Вычертить характеристику холостого хода синхронной машины.
2. Привести внешнюю характеристику синхронного генератора при активной нагрузке и определить процентное повышение напряжения при переходе от номинальной нагрузки к режиму холостого хода.
3. Начертить регулировочную характеристику генератора при работе его на нагрузку с $\cos \varphi = 1$.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 229—240.
- Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 456—473, 509.
- Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 409—424, 445—447.

Работа № 25

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Изучить конструкцию синхронного электродвигателя трехфазного тока и его асинхронный пуск через реакторы.
2. Снять U-образную кривую при холостом ходе электродвигателя.
3. Вычертить рабочие кривые синхронного электродвигателя и определить различные величины, характеризующие его работу при номинальном режиме.

Основные теоретические положения

Синхронный электродвигатель трехфазного тока состоит из статора, аналогичного статору асинхронной машины, и ротора.

Обмотки статора питаются от сети трехфазного тока и служат для создания вращающегося магнитного поля, скорость вращения которого

$$n = \frac{60 f}{p}, \quad (1)$$

где p — число пар полюсов машины.

Ротор представляет собой стальную поковку с электромагнитами, обмотки которых питаются от постороннего источника постоянного тока.

В качестве последнего может быть использован как генератор постоянного тока, так и выпрямительное устройство.

Постоянный ток подводится к обмотке вращающегося ротора через щетки, налагающиеся на два контактных кольца, к которым припаяны начало и конец обмотки ротора. Контактные кольца сидят на изолирующих втулках на валу машины.

Помимо обмотки электромагнитов, на роторе имеется еще коротко замкнутая обмотка, используемая при асинхронном пуске электродвигателя, а также обеспечивающая быстрое затухание колебаний скорости вращения ротора при переходных режимах.

Скорость вращения ротора синхронного электродвигателя в пределах допустимой нагрузки и кратковременной перегрузки всегда остается постоянной, равной

$$n = \frac{60 f}{p}. \quad (2)$$

Перед асинхронным пуском синхронного электродвигателя обмотка ротора замыкается на разрядное сопротивление

$$r_{\text{разр}} = (10 - 15) r_2, \quad (3)$$

где r_2 — активное сопротивление обмотки ротора.

Разрядное сопротивление необходимо для увеличения пускового момента электродвигателя, уменьшения величины перенапряжения в обмотке ротора при пуске, а также для обеспечения разгона ротора до подсинхронной скорости

$$n' = 0,95 n. \quad (4)$$

После подачи к обмоткам статора трехфазного напряжения и образования вращающегося магнитного поля ротор довольно быстро разгоняется до подсинхронной скорости n' , после чего разрядное сопротивление $r_{\text{разр}}$ отключается, в цепь ротора подается постоянный ток и электродвигатель переходит на синхронный режим работы.

Работа синхронного электродвигателя может протекать при различном значении $\cos \varphi$, который в значительной степени зависит от тока возбуждения I_B .

Зависимость, показывающая изменение тока статора I от тока ротора I_B , т. е. $I = f(I_B)$, при неизменной нагрузке носит название U-образной кривой и получается экспериментальным путем.

Рабочие свойства синхронного электродвигателя характеризуются его механической характеристикой $n = f(M)$, а также рабочими кривыми $I = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$, где P_2 — полезная мощность на валу электродвигателя, равная

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{975}, \quad (5)$$

где M — момент на валу синхронного электродвигателя, *кгм*;
 n — скорость вращения ротора, об/мин.

Величину момента на валу электродвигателя можно определить при помощи электромагнитного тормоза конструкции М. А. Панасенкова (рис. 98).

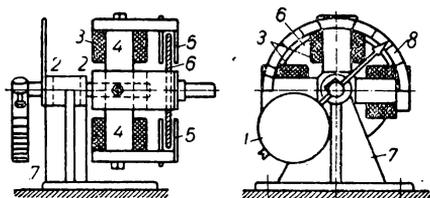


Рис. 98. Схема электромагнитного тормоза.

Четырехполюсный электромагнит 4, обмотки которого 3 показаны в разрезе, находится на оси, которая может вращаться в подшипниках качения 2, расположенных в стойке 7.

На этой же оси укреплен груз 1, который поворачивается вместе с магнитами.

Между полюсными наконечниками магнитов 5 находится свободно вращающийся стальной диск 6, сидящий на валу испытываемого синхронного электродвигателя.

При работе синхронного электродвигателя и наличии постоянного тока в обмотках электромагнитов тормоза во вращающемся диске 6 возникают вихревые токи.

Между вращающимся диском 6 и полюсными наконечниками магнитов 5 возникает усилие, которое стремится увлечь подвижную систему магнитов в сторону вращения ротора электродвигателя.

Груз 1 противодействует поворачиванию электромагнитов.

Регулируя ток в обмотках электромагнитов и изменяя тем самым величину тормозного момента, можно получить различные углы поворота магнитной системы.

Стрелка, поворачивающаяся вместе с грузом и магнитом, указывает на шкале 8 величину момента M .

Коэффициент полезного действия синхронного электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P + P_B}, \quad (6)$$

где P и P_B — мощности, потребляемые синхронным электродвигателем из сети трехфазного и постоянного токов.

Описание схемы установки

На рис. 99 показана схема асинхронного пуска синхронного электродвигателя трехфазного тока через реакторы P , ограничивающие величину пускового тока.

Электроизмерительная аппаратура, включенная через универсальные измерительные трансформаторы тока $ТТ$, позволяет определить все электрические величины, характеризующие работу синхронного электродвигателя.

Цепь ротора при пуске замыкается на разрядное сопротивление $r_{разр}$, а при работе подключается к сети постоянного тока через регулировочный реостат r_p .

Тормозной момент создается и определяется при помощи электромагнитного тормоза T конструкции М. А. Панасенкова, обмотки которого также питаются от сети постоянного тока через регулировочный реостат r'_p .

Скорость вращения ротора измеряют при помощи тахометра.

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией синхронного электродвигателя трехфазного тока и собрать схему для его испытания.

2. Плотно вставить короткозамыкающие вилки B универсальных трансформаторов тока $ТТ$ в средние гнезда, другими вилками установить необходимый коэффициент трансформации, включить двухполюсный рубильник P_3 и после проверки схемы руководителем замкнуть двухполюсным переключателем Π обмотку ротора на разрядное сопротивление $r_{разр}$ и, при разомкнутом трехполюсном рубильнике P_2 замкнуть трехполюсный рубильник P_1 .

3. При достижении ротором подсинхронной скорости в момент, когда стрелка амперметра, имеющего нуль посередине шкалы, включенного в цепь ротора синхронного электродвигателя, будет приближаться к нулю шкалы и начнет отклоняться в ту сторону, где она находится при рабочем режиме машины, необходимо *быстро* двухполюсным переключателем Π подать постоянный ток в обмотку ротора.

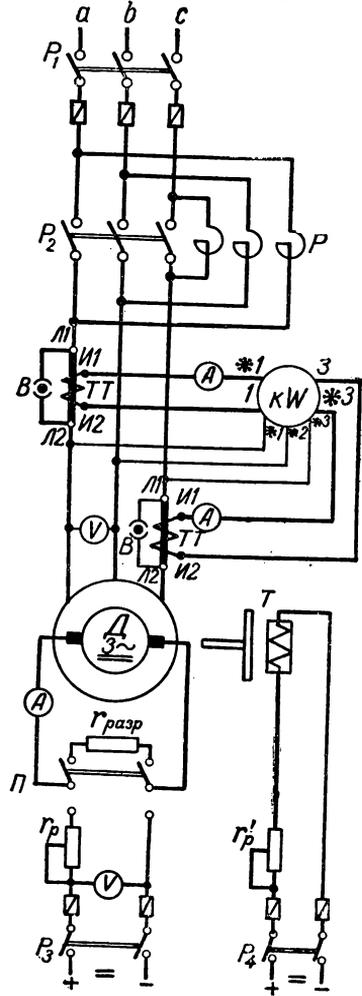


Рис. 99. Схема исследования синхронного электродвигателя трехфазного тока.

Затем следует трехполюсным рубильником P_2 замкнуть пусковые реакторы P накоротко.

4. Снять U-образную кривую синхронного электродвигателя в режиме холостого хода.

Для этого вынуть короткозамыкающие вилки B из средних гнезд и поставить в соседние холостые гнезда универсальных трансформаторов тока $ТТ$ и изменять ток возбуждения I_B от наибольшего, при котором ток статора $I = (1,20—1,25)I_n$, до наименьшего, отвечающего устойчивой работе электродвигателя, после чего записывать показания всех приборов.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Показания амперметров, a		Показание киловаттметра $P, квт$	Коэффициент трансформации k	Ток возбуждения I_B, a
		I_1	I_3			
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

5. Для снятия рабочих кривых синхронного электродвигателя отрегулировать ток возбуждения так, чтобы $\cos \varphi = 1$, записать показания всех приборов, после чего включить двухполюсный рубильник P_4 и, изменяя величину сопротивления реостата r_p , произвести измерения при токах статора $I = 25, 50, 100$ и $125\% I_n$, где I_n — номинальный ток статора синхронной машины.

Данные наблюдений представить таблицей.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Показания амперметров, a		Показание киловаттметра $P, квт$	Коэффициент трансформации k	Момент вращения $M, кгм$	Скорость вращения ротора $n, об/мин$	Примечание
		I_1	I_3					
1								Напряжение возбуждения $U_B = в,$ Ток возбуждения $I_B = a$
2								
3								
4								
5								
6								

6. Переписать данные измерительных приборов, использованных при испытании синхронного электродвигателя трехфазного тока, и записать его паспортные данные.

Обработка результатов испытания

1. Установить расчетом полюсов испытуемого синхронного электродвигателя.

2. Рассчитать величину коэффициента мощности для всех опытов, произведенных при снятии U-образной кривой, и результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	$U, в$	$I, а$	$P, квт$	$\cos\varphi$	$I_B, а$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

3. Вычертить U-образную кривую $I = f(I_B)$, отвечающую холостому ходу синхронного электродвигателя, а также зависимость $\cos\varphi = f(I_B)$.

4. Обработать результаты опытов при нагрузке электродвигателя и представить их таблицей.

№ опытов	$U, в$	$I, а$	$P, квт$	$\cos\varphi$	$M, кгм$	$n, об/мин$	$P_2, квт$	$P_B, квт$	η
1									
2									
3									
4									
5									
6									

5. Вычертить механическую характеристику $n = f(M)$, а также рабочие кривые: $I = f(P_2)$, $M = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ и по ним найти номинальные значения всех величин, характеризующих работу электродвигателя.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 241—250.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 494—509.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 442—447.

РАЗДЕЛ 5

КОЛЛЕКТОРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Работа № 26

ИСПЫТАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить конструкцию машины постоянного тока.
2. Снять характеристики: холостого хода, внешнюю и регулировочную.
3. Определить процентное повышение напряжения генератора при переходе от номинальной нагрузки к режиму холостого хода.

Основные теоретические положения

Генератор постоянного тока состоит из неподвижной магнитной системы, имеющей четное число главных полюсов, представляющих собой электромагниты, обмотки которых питаются постоянным током, и части, вращаемой приводным двигателем, называемой якорем.

В тех случаях, когда обмотки главных полюсов питаются от аккумуляторной батареи или другого источника постоянного тока, генератор называют генератором независимого возбуждения.

Если источником питания этих обмоток служит эта же машина, то ее называют самовозбуждающимся генератором.

Якорь представляет собой цилиндр, собранный из пакетов листовой электротехнической стали, в его пазах находится обмотка, которая присоединяется к коллекторным пластинам, на которые налагается система щеток.

Переменная электродвижущая сила, наводимая в обмотке якоря при его вращении, преобразуется при помощи коллектора и щеток в э. д. с. постоянного направления, действующую на зажимах генератора, к которым присоединяется нагрузка.

Величину этой э. д. с. определяют из соотношения

$$e = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi, \quad (1)$$

где p — число пар главных полюсов машины;

n — скорость вращения якоря, об/мин;

N — число активных проводников якоря;

a — число параллельных ветвей обмотки якоря;

Φ — магнитный поток одного главного полюса, вб.

В обычных условиях генератор постоянного тока работает при неизменной скорости вращения якоря, т. е. при $n = \text{const}$.

Тогда для определенного генератора соотношение (1) может быть записано в следующем виде:

$$e = c' \Phi, \quad (2)$$

где

$$c' = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a}, \quad (3)$$

и представляет собой некоторую постоянную величину для данной машины.

Из соотношения (2) следует, что э. д. с., наводимая в обмотке якоря при постоянной скорости вращения, зависит только от магнитного потока главных полюсов или от возбуждающего его тока $I_{\text{в}}$, т. е. $e = f(I_{\text{в}})$.

Зависимость э. д. с., наводимой в обмотке якоря e , от тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при отсутствии тока в обмотке якоря, т. е. при $I_{\text{я}} = 0$ и постоянной скорости вращения ($n = \text{const}$), называется характеристикой холостого хода.

Форма этой кривой, позволяющей судить о магнитных свойствах генератора, зависит от степени насыщения стали машины и не зависит от способа возбуждения.

Так как эта характеристика снимается при отсутствии тока в обмотке якоря ($I_{\text{я}} = 0$), то сам генератор не может быть использован в качестве источника энергии для питания обмотки возбуждения.

Поэтому характеристику холостого хода лучше всего снимать при независимом возбуждении, питая обмотки, расположенные на главных полюсах машины, от какого-либо постороннего источника электрической энергии постоянного тока.

Для этого вращают якорь приводным двигателем с номинальной скоростью вращения и дают наибольшее возбуждение.

Затем постепенно уменьшают ток возбуждения до нулевого значения, после чего постепенно увеличивают его до предельного, получая таким образом нисходящую и восходящую ветви характеристики холостого хода $e = f(I_{\text{в}})$.

Последние не совпадают друг с другом из-за явления магнитного гистерезиса.

В тех случаях, когда не требуется большая точность в характеристике холостого хода, ее можно снять и при самовозбуждающемся генераторе параллельного или смешанного возбуждения.

При снятии магнитной характеристики при самовозбуждающемся генераторе по обмотке якоря будет протекать ток

$$I_{\text{я}} = I_{\text{в}}, \quad (4)$$

т. е. ток, равный току возбуждения.

Так как этот ток при параллельном возбуждении составляет всего 1—5% от номинального тока машины $I_{\text{н}}$, то его влияние на полученную характеристику практически ничтожно.

При подключении к генератору нагрузки по обмотке якоря потечет ток $I_{\text{я}}$, который вызовет появление магнитного поля якоря.

Последнее, воздействуя на основное магнитное поле главных полюсов (реакция якоря), вызовет ослабление магнитного потока Φ , в результате чего э. д. с. генератора уменьшится.

Уменьшение э. д. с. приведет к снижению напряжения

$$U = e - I_{\text{я}} r_{\text{я}}, \quad (5)$$

где $r_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря.

При возрастании нагрузки, а следовательно, и увеличении тока якоря $I_{\text{я}}$, падение напряжения в его цепи

$$\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{я}} r_{\text{я}} \quad (6)$$

будет увеличиваться, что приведет к дополнительному снижению напряжения генератора.

При параллельно приключенной обмотке возбуждения уменьшение напряжения ослабит ток возбуждения

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{r_{\text{в}} + r_{\text{р}}}, \quad (7)$$

где $r_{\text{в}}$ — сопротивление параллельной обмотки возбуждения;

$r_{\text{р}}$ — сопротивление регулировочного реостата, соединенного последовательно с обмоткой возбуждения; что приведет к уменьшению магнитного потока Φ , э. д. с., а следовательно, и напряжения U .

Таким образом, в генераторе параллельного возбуждения при увеличении нагрузки наблюдается заметное снижение напряжения.

В пределах номинальной мощности машины напряжение снижается довольно плавно, а при значительных перегрузках — резко.

При кратковременном токе $I_{\text{крат}} = (2 - 3) I_n$ наблюдается опрокидывание, которое сопровождается быстрым снижением напряжения до нулевого значения и установлением в цепи якоря тока короткого замыкания I_k за счет небольшой э. д. с., наводимой в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма главных полюсов.

Так как ток короткого замыкания I_k часто бывает меньше номинального тока машины, то генераторы постоянного тока параллельного возбуждения не боятся коротких замыканий.

В генераторе постоянного тока смешанного возбуждения при согласном включении последовательной обмотки возбуждения с параллельной и возрастании нагрузки машины магнитный поток Φ будет несколько увеличиваться.

Благодаря этому напряжение на зажимах генератора мало изменяется и значительно облегчается эксплуатация такой машины.

Свойства генератора, работающего на переменную нагрузку, определяются изменением его напряжения U от тока потребителей I при неизменном сопротивлении цепи возбуждения и постоянной скорости вращения якоря.

Такая зависимость $U = f(I)$ при $r_v + r_p = \text{const}$ и $n = \text{const}$, представленная в виде графика, называется внешней характеристикой генератора.

Эта характеристика является очень важной для эксплуатации, так как по ней можно установить автоматическое изменение напряжения генератора при переменной нагрузке.

Изменение величины напряжения генератора принято характеризовать величиной

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где ΔU — процентное изменение напряжения генератора при переходе от номинальной нагрузки к режиму холостого хода;

U_0 и U_n — напряжения соответственно при холостом ходе генератора и его номинальное напряжение.

Так как у генератора параллельного возбуждения при переменной нагрузке наблюдается заметное изменение величины напряжения, то его необходимо регулировать.

Такое регулирование производится изменением тока возбуждения I_v вручную или автоматически.

Кривая, показывающая потребное изменение тока возбуждения I_v в зависимости от тока нагрузки I для поддержания неизменного напряжения U при постоянной скорости вращения n , называется регулировочной характеристикой генератора.

Для генератора постоянного тока параллельного возбуждения эта кривая при увеличении нагрузки должна идти плавно вверх, а для генератора смешанного возбуждения — мало отличаться от горизонтальной прямой.

Описание схемы установки

Экспериментальная установка (рис. 100) состоит из спаренных приводного асинхронного электродвигателя и генератора постоянного тока с параллельной Ш1—Ш2 и последовательной С1—С2 обмотками возбуждения.

Амперметр в цепи статора асинхронного электродвигателя служит для наблюдения величины нагрузки приводного двигателя при различных режимах работы генератора.

Скорость вращения асинхронного электродвигателя из-за небольшой величины скольжения s практически может быть принята при всех режимах постоянной.

В цепи генератора предусмотрены приборы для измерения его напряжения, тока нагрузки и тока возбуждения.

Регулировочным реостатом r_p изменяют ток возбуждения, а однополюсным рубильником P_v производят разрыв цепи возбуждения.

Однополюсный переключатель P дает возможность испытать машину при параллельном и при смешанном возбуждении.

Нагрузка генератора осуществляется при помощи лампового реостата r .

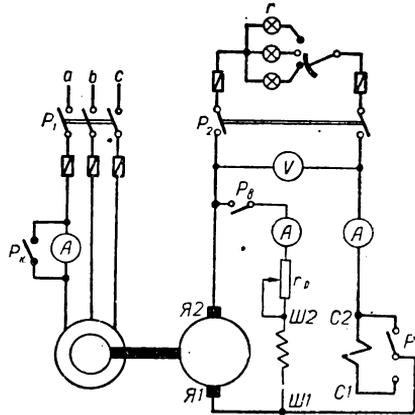


Рис. 100. Схема испытания генератора постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения.

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией машины, определить число главных и дополнительных полюсов, число групп щеток и выводов.

Результаты осмотра свести в таблицу.

Число полюсов		Число групп щеток	Число выводов и их маркировка
главных	дополнительных		

2. Собрать схему для испытания генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

3. Разомкнуть двухполюсный рубильник P_2 , замкнуть рубильники P_B и P_K , поставить однополюсный переключатель P в положение, отвечающее параллельному возбуждению машины и *после проверки схемы руководителем* включить трехполюсный рубильник P_1 приводного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

После разгона агрегата однополюсный рубильник P_K разомкнуть.

Если машина не возбудилась, принять соответствующие меры для самовозбуждения генератора.

4. Установить регулировочным реостатом r_p такой ток возбуждения, при котором напряжение на зажимах генератора будет на 20—25% выше номинального напряжения машины.

5. Двигая ползунок регулировочного реостата r_p *только в одном направлении*, уменьшать ток возбуждения до минимально возможного, отмечая и записывая для различных значений токов соответствующие им напряжения.

Разомкнуть однополюсный рубильник P_B и записать значение э. д. с., обусловливаемую остаточным магнетизмом полюсов.

6. Замкнуть однополюсный рубильник P_B и сделать отсчеты по приборам, затем, перемещая ползунок регулировочного реостата r_p *только в одном направлении*, устанавливать различный ток возбуждения и записывать отвечающее ему напряжение.

Ток возбуждения увеличивать до тех пор, пока напряжение на зажимах генератора не будет превышать номинальное на 20—25%.

Результаты опытов четвертого, пятого и шестого пунктов свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение генератора при холостом ходе $U_0, \text{ в}$	Ток возбуждения $I_B, \text{ а}$
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		

7. Возбудить генератор до напряжения, превышающего номинальное на 20—25%, включить двухполюсным рубильником P_2 нагрузку и, регулируя число включенных ламп и ток возбуждения, установить такой режим, при котором генератор отдавал бы номинальный ток при номинальном напряжении.

В дальнейшем регулировочный реостат r_p не трогать и приступить к снятию внешней характеристики генератора параллельного возбуждения.

8. Выключить все лампы в нагрузочном реостате r и записать показания всех приборов.

Затем включением различного числа ламп увеличивать нагрузку до номинального тока, в дальнейшем провести испытание при перегрузке с таким расчетом, чтобы получить явление опрокидывания и короткого замыкания.

Примечание. При испытании генератора в перегрузочном режиме опыты следует производить быстро во избежание перегрева обмотки якоря.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение генератора $U, в$	Ток, a	
		нагрузки I	возбуждения I_B
1			
2			
3			
4			
5			
6			

9. Отключить нагрузку генератора, отрегулировать номинальное напряжение в режиме холостого хода и записать, какой при этом будет ток холостого хода.

10. Нагружать машину токами, близкими к 25, 50, 75, 100 и 125% номинального тока генератора, и каждый раз устанавливать такой ток возбуждения, при котором напряжение генератора оставалось бы номинальным.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение генератора $U, в$	Ток, a	
		нагрузки I	возбуждения I_B
1		0	
2			
3			
4			
5			
6			

11. Снять внешнюю и регулировочную характеристику генератора смешанного возбуждения.

Для этого выключить рубильник P_2 , поставить нож однополюсного переключателя P в другое положение и повторить опыты, описанные в пунктах 7, 8, 9 и 10.

Результаты наблюдений представить в виде двух таблиц, аналогичных таблицам, приведенным в пунктах 8 и 10.

Примечание. При испытании генератора смешанного возбуждения при согласно включенных обмотках возбуждения $Ш1-Ш2$ и $C1-C2$ увеличение нагрузки производить до тока, превышающего номинальный ток машины на 20—25%.

12. Составить перечень аппаратуры, использованной при испытании генератора постоянного тока, и записать данные паспортов электрических машин.

Обработка результатов испытания

1. Вычертить характеристику холостого хода генератора и определить отношение $\frac{e_0}{U_n}$, выразив его в процентах.

2. Вычертить в одной координатной системе внешние характеристики генератора параллельного и смешанного возбуждения, а в другой — регулировочные.

3. Вычислить процентное повышение напряжения генератора при переходе от номинальной нагрузки к режиму холостого хода при параллельном и смешанном возбуждении машины.

4. Установить значение критического тока и тока короткого замыкания генератора постоянного тока параллельного возбуждения и подсчитать их отношение к номинальному току машины.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 250—258, 261—268.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 510—524, 526—529, 540—553.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 257—266, 273—303.

Работа № 27

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить способ пуска, реверса и регулирования скорости вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

2. Испытать электродвигатель методом нагрузочного генератора.

3. Построить механическую характеристику и рабочие кривые электродвигателя и определить номинальные значения величин, характеризующих его работу.

Основные теоретические положения

Машины постоянного тока обратимы, т. е. они могут работать без всякой переделки как в генераторном, так и в двигательном режимах.

При использовании машины постоянного тока в режиме электродвигателя непосредственный пуск от сети при номинальном напряжении U осуществлен быть не может из-за большого пускового тока

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}, \quad (1)$$

где $r_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря, измеряющееся долями ома.

Пусковой ток может превышать номинальный ток машины в 10—50 раз, что представляет опасность для обмотки якоря и коллектора.

Для уменьшения величины пускового тока обычно в цепь якоря на период пуска вводят дополнительное регулируемое сопротивление $r_{\text{п}}$, называемое пусковым реостатом.

Наличие такого дополнительного пускового приспособления приводит к уменьшению тока в цепи якоря, который в момент включения будет

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}}}. \quad (2)$$

В результате взаимодействия тока, протекающего по проводникам, якоря и магнитного поля электродвигателя возникает вращающий момент

$$M = \kappa \Phi I_{\text{я}}, \quad (3)$$

под влиянием которого якорь начинает вращаться.

Вращающаяся обмотка якоря пересекает неподвижные магнитные силовые линии машины и в ней наводится противоэлектродвижущая сила

$$e = c \Phi n. \quad (4)$$

Коэффициенты κ и c , входящие в формулы (3) и (4) зависят от конструктивных элементов машины.

Возникающая противоэлектродвижущая сила e по мере увеличения скорости вращения вызовет уменьшение тока в якорю

$$I_{\text{я}} = \frac{U - e}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}}} = \frac{U - c \Phi n}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}}}, \quad (5)$$

в результате чего вращающий момент электродвигателя начинает снижаться.

Во избежание уменьшения момента, а следовательно, и удлинения пускового периода, необходимо во время разбега электродвигателя сопротивление пускового реостата постепенно уменьшать и к концу пуска свести его до нулевого значения.

Таким образом, при работе, протекающей при выведенном пусковом реостате ($r_n = 0$), ток в цепи якоря определяется соотношением

$$I_{\text{я}} = \frac{U - c\Phi n}{r_{\text{я}}} \quad (6)$$

и разница между наведенной противоэлектродвижущей силой $e = c\Phi n$ и подведенным напряжением U будет незначительна.

Если при пуске электродвигатель пришел во вращение в противоположную сторону, его необходимо реверсировать, т. е. изменить направление тока в обмотке возбуждения или в обмотке якоря, что достигается переменной концов соответствующих обмоток.

При этом одна из величин, входящих в уравнение (3), изменит свой знак, вращающий момент начнет действовать в другую сторону и якорь изменит направление вращения на противоположное.

Скорость вращения якоря определяется соотношением (6)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{c\Phi}, \quad (7)$$

где U — напряжение на зажимах якоря, в;

Φ — величина магнитного потока машины, вб.

Как видно из соотношения (7), скорость вращения якоря электродвигателя постоянного тока можно плавно регулировать в довольно широких пределах путем изменения величины напряжения U , подводимого к обмотке якоря, или величины магнитного потока машины Φ .

Первый способ в обычных условиях достигается введением в цепь якоря пускорегулировочного реостата, рассчитанного на длительный режим работы при номинальном токе машины, а второй — при параллельном возбуждении, включением последовательно с обмоткой возбуждения регулировочного реостата, рассчитанного на ток возбуждения машины, составляющий только 1—5% номинального тока машины.

Снижение напряжения на зажимах якоря позволяет понизить скорость вращения ниже номинальной, а ослабление магнитного поля дает увеличение скорости вращения сверх номинальной.

Первый способ сопровождается значительными тепловыми потерями, а второй дает плавное и экономичное регулирование скорости вращения якоря электродвигателя.

Предел повышения скорости вращения ограничен условиями коммутации, механической прочностью и возрастанием тока якоря при постоянном моменте сопротивления на валу машины.

В современных машинах постоянного тока мощностью до 5 кВт скорость вращения может быть повышена до 50% по отношению к номинальной, а в специальных машинах, предназначенных для широкого регулирования скорости вращения, значительно выше и доходит до соотношения 5:1.

Для характеристики регулировочных свойств электродвигателя строят кривые, показывающие изменение скорости вращения n от величины напряжения U на зажимах якоря при неизменном токе возбуждения $I_{\text{в}}$ либо при изменении тока возбуждения $I_{\text{в}}$ и постоянном напряжении на зажимах якоря U при холостом ходе машины, т. е. $n = f(U)$ при $I_{\text{в}} = \text{const}$ и $n = f(I_{\text{в}})$ при $U = \text{const}$, которые снимаются экспериментальным путем.

При работе нагруженного электродвигателя так же, как и при генераторном режиме проявляется реакция якоря, ослабляющая магнитный поток машины.

Несмотря на небольшое ослабление магнитного потока при возрастании нагрузки, скорость вращения якоря n при постоянном напряжении U и неизменном сопротивлении цепи возбуждения не увеличивается, а уменьшается из-за увеличивающегося падения напряжения $I_{\text{я}} r_{\text{я}}$ в цепи якоря.

Снижение скорости

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \cdot 100\% \quad (8)$$

при переходе от режима холостого хода ($n = n_0$) к номинальной нагрузке ($n = n_n$) не велико и обычно не превышает 2—10% в зависимости от мощности и типа машины.

Изменение нагрузки на валу электродвигателя сказывается на изменении потребления тока, который при холостом ходе составляет всего 3—10% I_n , а при увеличении ее возрастает пропорционально ей до номинального тока I_n и выше.

При работе машины постоянного тока в режиме электродвигателя имеют место механические, магнитные, электрические и добавочные потери.

Коэффициент полезного действия находится как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (9)$$

где P_1 и P_2 — потребляемая и отдаваемая мощности электродвигателем.

Мощность, подводимая к электродвигателю, вычисляется по формуле

$$P_1 = U(I_{\text{я}} + I_{\text{в}}), \quad (10)$$

где U — напряжение сети, питающей электродвигатель;
 $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$ — токи, протекающие соответственно в цепи якоря и обмотки возбуждения.

Мощность, отдаваемая электродвигателем на валу P_2 , определяется методом нагрузочного генератора, спаренного с испытуемым электродвигателем при помощи муфты.

Измеряя отдаваемую им мощность

$$P_0 = U_0 I_0, \quad (11)$$

где U_0 и I_0 — соответственно напряжение и ток нагрузочного генератора постоянного тока, и зная его к. п. д. для различных нагрузок, т. е. зависимость $\eta_{\text{г}} = f(P_0)$, находят мощность, отдаваемую испытуемым электродвигателем,

$$P_2 = \frac{P_0}{\eta_{\text{г}}}, \quad (12)$$

где $\eta_{\text{г}}$ — значение к. п. д. нагрузочного генератора, отвечающее соответствующему режиму работы.

Момент, развиваемый электродвигателем, определяется из соотношения

$$M = 975 \frac{P_2}{n}, \quad (13)$$

где n — скорость вращения якоря.

Рабочие свойства электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения характеризуются его механической характеристикой $n = f(M)$, а также рабочими кривыми: $n = f(P_2)$; $I_{\text{я}} = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$, которые получаются в результате опытного исследования машины.

Описание схемы установки

Экспериментальная установка (рис. 101) состоит из двух машин постоянного тока параллельного возбуждения, которые соединены между собой муфтой.

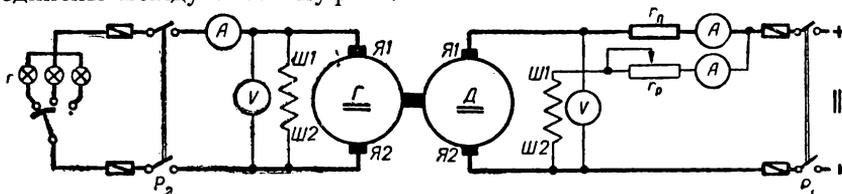


Рис. 101. Схема испытания электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Машина $Д$ используется в качестве испытуемого электродвигателя.

В ее цепях предусматриваются два реостата: пускорегулировочный r_n и регулировочный r_p , а также необходимая измерительная аппаратура.

Машина Γ служит нагрузочным генератором, работающим на ламповый реостат r .

Электроизмерительные приборы, находящиеся в ее цепи, позволяют определять мощность, отдаваемую генератором P_0 .

Скорость вращения вала электродвигателя измеряется тахометром.

Проведение опыта

1. Собрать схему испытания электродвигателя постоянного тока с нагрузочным генератором.

2. Ввести полностью пускорегулировочный реостат r_n , находящийся в цепи якоря, регулировочный реостат возбуждения r_p весь вывести, разомкнуть двухполюсный рубильник P_2 и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник P_1 .

Как только якорь придет во вращение, выводить пускорегулировочный реостат с такой скоростью, чтобы ток в цепи якоря при пуске не превышал бы номинальный ток машины более чем на 30—50 %.

Если генератор не возбудился, то принять меры для его возбуждения.

3. Устанавливать пускорегулировочным реостатом r_n различные напряжения на зажимах якоря и измерять тахометром скорость вращения вала машины, поддерживая на протяжении всего опыта регулировочным реостатом r_p неизменный ток возбуждения, близкий к наибольшему.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение на зажимах якоря $U, \text{ в}$	Скорость вращения якоря электродвигателя $n, \text{ об/мин}$	Ток возбуждения $I_{в. а}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

4. Устанавливать регулировочным реостатом r_p различный ток возбуждения и измерять тахометром скорость вращения машины, не допуская ее увеличения свыше 25—30 % по отношению к номинальной.

При проведении опыта пускорегулировочным реостатом r_n поддерживать на зажимах якоря неизменное напряжение, близкое к номинальному.

Результаты опытов представить таблицей.

№ опытов	Ток возбуждения I_B, a	Скорость вращения якоря электродвигателя $n, об/мин$	Напряжение на зажимах якоря $U, в$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

5. Приступить к испытанию электродвигателя в нагрузочном режиме. Для этого реостатами r_n и r_p отрегулировать и поддерживать на протяжении всех опытов напряжение на зажимах якоря и ток возбуждения неизменными, близкими к номинальным значениям этих величин, замкнуть двухполюсный рубильник P_2 и, изменяя число включенных ламп в нагрузочном реостате r , испытать электродвигатель при токах $I_a = 0, 25, 50, 75, 100$ и $125\% I_n$, где I_n — номинальный ток машины.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение на зажимах якоря электро- двигателя $U, в$	Ток якоря электро- двигателя I_a, a	Ток возбуждения электро- двигателя I_B, a	Скорость вращения вала машины $n, об/мин$	Напряжение нагрузоч- ного гене- ратора $U_0, в$	Ток нагрузоч- ного гене- ратора I_0, a
1						0
2						
3						
4						
5						
6						

6. Составить перечень аппаратуры, использованной при выполнении работы, записать в таблицу данные паспортов электрических машин и значения к. п. д. нагрузочного генератора при различных режимах его работы.

Нагрузка генератора, %	0	25	50	75	100	125
К.п.д. генератора	0					

Обработка результатов испытания

1. Вычертить в одной координатной системе кривую $n = f(U)$ при $I_B = \text{const}$, в другой — $n = f(I_B)$ при $U = \text{const}$ и вычислить отношение $\frac{n_{\max}}{n_{\min}}$, где n_{\max} и n_{\min} — наибольшая и наименьшая скорость вращения якоря.

2. Рассчитать для всех произведенных опытов нагрузки электродвигателя следующие величины: потребляемую P_1 и отдаваемую P_2 мощности, коэффициент полезного действия η и вращающий момент M .

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	$U, \text{в}$	$I_A, \text{а}$	$I_B, \text{а}$	$P_1, \text{квт}$	$U_0, \text{в}$	$I_0, \text{а}$	T_r	$P_2, \text{квт}$	η	$n, \text{об/мин}$	$M, \text{кгм}$
1						0	0	0	0		0
2											
3											
4											
5											
6											

3. Построить в одной координатной системе механическую характеристику электродвигателя, а в другой его рабочие кривые: $n = f(P_2)$; $I_A = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$ при $U = \text{const}$, $I_B = \text{const}$ и найти из них номинальные значения всех величин, характеризующих работу электродвигателя.

4. Выразить в процентах изменение скорости вращения Δn электродвигателя при переходе от режима холостого хода к номинальной нагрузке.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 270—274.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 556—572, 577—582.

Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 304—311, 316—317.

Работа № 28

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить способы включения генераторов постоянного тока на параллельную работу.

2. Экспериментальным путем установить закономерность автоматического распределения нагрузки между параллельно работающими машинами.

3. Исследовать параллельную работу генераторов в режиме регулировочной характеристики.

4. Произвести отключение от шин одного из параллельно работающих генераторов постоянного тока.

Основные теоретические положения

Параллельная работа генераторов постоянного тока представляет собой наиболее распространенный случай их совместной работы на общие шины.

Указанный режим дает возможность за счет изменения числа агрегатов, участвующих в параллельной работе, проводить на электрических станциях работу по генерированию электрической энергии при переменной нагрузке с лучшим коэффициентом полезного действия, а также обеспечивает меньшую мощность резервных единиц.

Первичные двигатели, приводящие генераторы во вращение, имеют обычно автоматические регуляторы скорости вращения, вследствие чего параллельная работа машин протекает всегда при неизменном числе оборотов в минуту.

При таком режиме нагрузка на параллельно работающие генераторы будет автоматически распределяться пропорционально их мощности только при одинаковых внешних характеристиках.

Если эти характеристики различны, то при увеличении нагрузки это приводит к перегрузке генератора с пологой внешней характеристикой и к недогрузке машины, обладающей более крутой характеристикой, а при разгрузке агрегатов имеет место обратная картина.

Как видно из рис. 102, генераторы с различными внешними характеристиками 1 и 2, имевшие одинаковое напряжение холостого хода u_0 , будучи нагруженными, отдадут разные токи i_1 и i_2 при напряжении u , причем $i_1 > i_2$.

Из рис. 103 видно, что эти генераторы, работавшие при номинальном напряжении u_H и номинальных токах i_H , будучи разгруженными, отдадут также разные токи i_1 и i_2 при новом напряжении u , но уже $i_1 < i_2$.

Как видно из кривых (рис. 102 и 103) параллельная работа машин в режиме внешней характеристики, т. е. при автоматическом распределении нагрузки между ними, сопровождается изменением напряжения в сети и протекает при неодинаковом использовании агрегатов.

Эти графические зависимости (рис. 102 и 103) получаются в результате проведения эксперимента над параллельно работающими генераторами, вращаемыми с неизменными номинальными скоростями n_1 и n_2 .

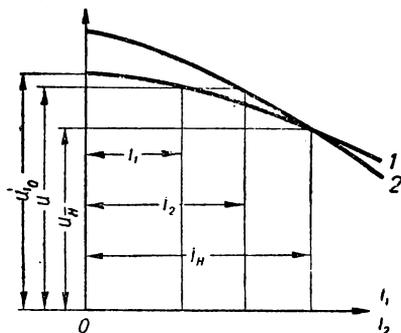


Рис. 103. Распределение токов между генераторами параллельного возбуждения при уменьшении нагрузки.

Следует обратить внимание на то, что при разгрузке параллельно работающих генераторов в режиме внешней характеристики генератор с более жесткой характеристикой (кривая 1, рис. 103) в области малых нагрузок перейдет на режим работы электродвигателя, что произойдет при $u > u_{10}$, где u_{10} — напряжение генератора G_1 при его холостом ходе.

Для одинакового использования параллельно работающих генераторов с различными внешними характеристиками и поддержа-

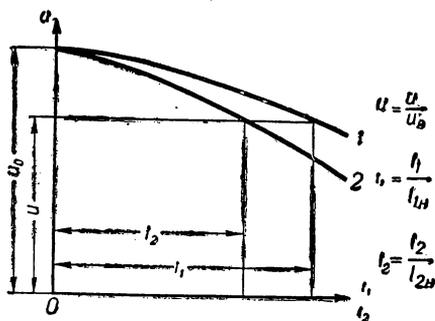


Рис. 102. Распределение токов между генераторами параллельного возбуждения при увеличении нагрузки.

$$i_1 = \frac{i_1}{i_{1H}}$$

$$i_2 = \frac{i_2}{i_{2H}}$$

$$u = \frac{u}{u_H}$$

При проведении опыта нагрузка на генераторы постепенно увеличивается от нулевой до значения, соответствующего перегрузке машин на 20—25% (рис. 102), а также при изменении нагрузки в обратном направлении до холостого хода генераторов (рис. 103).

ния постоянства напряжения в сети необходимо проводить приудительное распределение нагрузки за счет такого одновременного изменения токов возбуждения источников энергии, при котором величина напряжения в сети остается неизменной.

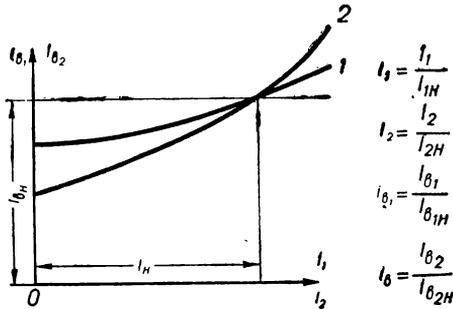


Рис. 104. Изменение токов возбуждения параллельно работающих генераторов в режиме регулировочной характеристики при переменной нагрузке.

Таким образом, для совместной работы генераторов постоянного тока параллельного возбуждения с различными внешними характеристиками основным режимом является режим регулировочной характеристики, выраженный кривыми, показывающими необходимые изменения токов возбуждения i_{θ_1} и i_{θ_2} в зависимости от токов нагрузки i_1 и i_2 при неизменных напряжении u и скоростях вращения n_1 и n_2 , т. е.

$$i_{\theta_1} = f(i_1) \text{ и } i_{\theta_2} = f(i_2) \text{ при } u = \text{const}, n_1 = \text{const} \text{ и } n_2 = \text{const}.$$

Такие кривые (рис. 104) получаются опытным путем.

При значительном уменьшении нагрузки на электрическую станцию необходимо отключить от общих шин один из параллельно работающих генераторов.

Данная операция должна быть проведена без толчков тока и заметных колебаний напряжения в сети.

Это достигается предварительным переводом нагрузки с отключаемой машины на генератор, оставляемый в работе.

Практически это осуществляется одновременным регулированием токов возбуждения генераторов при постоянном напряжении сети.

Графическое изображение перевода нагрузки с одного генератора на другой представлено кривыми рис. 105.

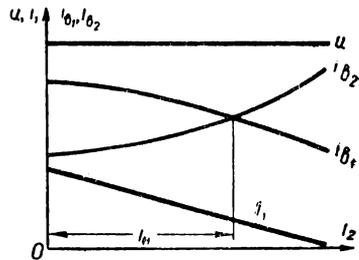


Рис. 105. Перевод нагрузки с одного генератора параллельного возбуждения на другой.

Описание схемы установки

Экспериментальная установка (рис. 106) состоит из двух различных по мощности агрегатов, каждый из которых представляет собой спаренные машины постоянного тока параллельного возбуждения.

Одна из машин каждого агрегата применяется в качестве приводного двигателя, а другая предназначается для использо-

вания в генераторном режиме при работе на общие шины, к которым присоединена нагрузка r .

В цепях каждой машины предусмотрена соответствующая измерительная, пусковая и регулировочная аппаратура.

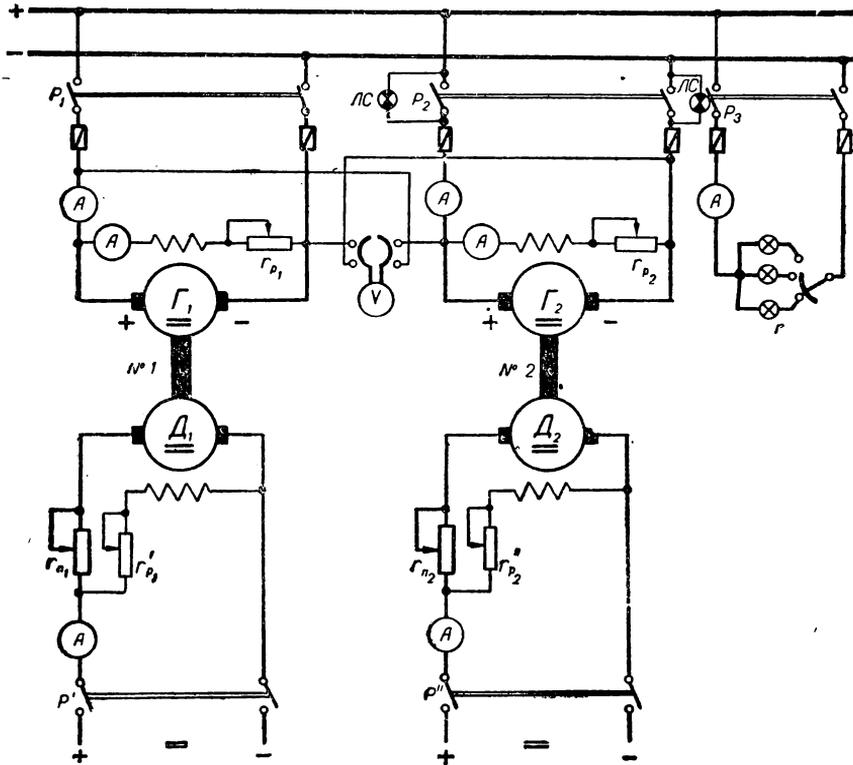


Рис. 106. Схема исследования параллельной работы генераторов постоянного тока.

Сигнальные лампы $ЛС$, включенные параллельно рубильнику P_2 , служат для проверки соответствия полярности генераторов Γ_1 и Γ_2 , включаемых на общие шины.

Проведение опыта

1. Собрать схему для исследования параллельной работы генераторов постоянного тока и поставить пусковые r_{n1} и r_{n2} и регулировочные r_{p1}' и r_{p2}'' реостаты приводных электродвигателей Δ_1 и Δ_2 в пусковые положения.

2. После проверки схемы руководителем пустить агрегат № 1. Затем пускорегулировочной аппаратурой электродвигателя установить номинальную скорость вращения n_1 и, изменяя регулиро-

вочным реостатом r_{p_1} возбуждение генератора, получить на его зажимах номинальное значение величины напряжения U_n , после чего включить его двухполюсный рубильник P_1 на общие шины и рубильником P_3 присоединить нагрузку.

3. Пустить агрегат № 2, установить номинальную скорость его вращения n_2 и отрегулировать величину напряжения генератора G_2 так, чтобы она была равна напряжению работающей машины G_1 .

4. При помощи сигнальных ламп ЛС убедиться в соответствии полярности второго генератора первому, после чего приключить второй агрегат на параллельную работу с первым.

Примечание. Соответствие полярности генераторов определяется по отсутствию накала ламп, включенных параллельно рубильнику подключаемой машины.

5. Приступить к исследованию параллельной работы генераторов в режиме внешней характеристики.

Для этого двухполюсным рубильником P_3 отключить от параллельно работающих генераторов нагрузку r , установить номинальные скорости вращения n_1 и n_2 , которые в течение всего опыта поддерживать постоянными, отрегулировать регулировочными реостатами r_{p_1} и r_{p_2} генераторов номинальное напряжение U_n на шинах так, чтобы машины находились в режиме холостого хода.

6. Включить небольшую нагрузку и, сохраняя $n_1 = \text{const}$, $n_2 = \text{const}$, $r_{p_1} = \text{const}$, $r_{p_2} = \text{const}$, наблюдать за распределением нагрузочного тока между работающими генераторами и следить за величиной напряжения U на шинах станции.

В дальнейшем постепенно увеличивать нагрузку пока ток одного из параллельно работающих генераторов не превысит на 20—25% свое номинальное значение.

Затем, уменьшая возбуждение перегруженного генератора, продолжать нагружать оставшийся в работе генератор до перегрузки его на 20—25%, записывая показания *только* его приборов.

Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Генератор G_1		Генератор G_2		Нагрузка		Примечание	
	Скорость вращения n_1 , об/мин	Ток, a		Скорость вращения n_2 , об/мин	Ток, a			Напряжение U_B
		нагрузки I_1	возбуждения I_{B1}		нагрузки I_2	возбуждения I_{B2}		
1								Режим внешней характеристики
2								
3								

7. Исследовать параллельную работу генераторов в режиме регулировочной характеристики.

Для этого отключить нагрузку от параллельно работающих генераторов, установить номинальные скорости вращения агрегатов n_1 и n_2 , которые в течение всего времени проведения опытов поддерживать постоянными, отрегулировать регулировочными релостатами генераторов номинальное напряжение U_n так, чтобы обе машины находились в режиме холостого хода.

8. Включить небольшую нагрузку и, сохраняя $n_1 = \text{const}$ и $n_2 = \text{const}$, одновременным воздействием на регулировочные релостаты r_{p_1} и r_{p_2} добиться распределения тока нагрузки между обоими генераторами пропорционально их номинальным мощностям при неизменном напряжении сети.

В дальнейшем нагрузку увеличивать до значения нагрузочного тока $I = (1,20-1,25) \cdot (I_{1n} + I_{2n})$.

Результаты опытов представить таблицей.

№ опытов	Генератор G_1			Генератор G_2			Нагрузка		Примечание
	Скорость вращения $n_1, \text{об/мин}$	Ток, a		Скорость вращения $n_2, \text{об/мин}$	Ток, a		Напряжение $U, \text{в}$	Ток I, a	
		нагрузки I_1	возбуждения I_{B1}		нагрузки I_2	возбуждения I_{B2}			
1									Режим регулировочной характеристики
2									
3									
4									
5									
6									

9. Приступить к исследованию перевода нагрузки с одного генератора на другой.

Для этого нагрузить генератор G_2 меньшей мощности номинальным током при номинальном напряжении и номинальной скорости вращения n_2 и подключить к нему на параллельную работу генератор G_1 .

10. Сохраняя скорости вращения агрегатов n_1 и n_2 неизменными, уменьшать ток возбуждения генератора G_1 и одновременно с этим увеличивать у генератора G_2 так, чтобы напряжение в сети оставалось постоянным и наблюдать за распределением токов между работающими машинами.

В конце эксперимента всю нагрузку перевести на генератор G_1 , а затем путем регулирования токов возбуждения перевести генератор G_2 в режим электродвигателя.

Результаты экспериментов свести в таблицу.

№ опытов	Генератор G_1		Генератор G_2		Нагрузка		Примечание
	Скорость вращения n_1 , об/мин	Ток, а	Скорость вращения n_2 , об/мин	Ток, а	Напряжение U_0 , в	Ток $I, а$	
	нагрузки I_1	возбуждения $I_{в1}$	нагрузки I_2	возбуждения $I_{в2}$			
1							Режим перевода нагрузки с одного генератора на другой
2							
3							
4							
5							
6							

11. Составить полный перечень измерительной, пусковой, регулировочной аппаратуры и электрических машин с перечислением всех их технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Пересчитать данные опытов в относительных единицах:

$$u = \frac{U}{U_n}, \quad i_1 = \frac{I_1}{I_{1н}}, \quad i_2 = \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad i_{в1} = \frac{I_{в1}}{I_{в1н}} \text{ и } i_{в2} = \frac{I_{в2}}{I_{в2н}}.$$

Результаты расчетов представить таблицей.

№ опытов	Генератор Γ_1					Генератор Γ_2					Нагрузка			Режим работы
	$n_1, \text{об/мин}$	I_1, a	I_{B1}, a	i_1	i_{B1}	$n_2, \text{об/мин}$	I_2, a	I_{B2}, a	i_2, a	i_{B2}, a	$U, \text{в}$	I, a	u	
1														Внешней характеристики
2														
3														
4														
5														
6														
1														Регулировочной характеристики
2														
3														
4														
5														
6														
1														Перевода нагрузки
2														
3														
4														
5														
6														

2. Построить в одной координатной системе зависимости $u = f(i_1)$ и $u = f(i_2)$ при $n_1 = \text{const}$, $n_2 = \text{const}$, $r_{p_1} = \text{const}$, $r_{p_2} = \text{const}$; в другой координатной системе: $i_{B_1} = f(i_1)$ и $i_{B_2} = f(i_2)$ при $n_1 = \text{const}$, $n_2 = \text{const}$, $u = \text{const}$ и в третьей координатной системе: $i_1 = f(i_2)$, $i_{B_1} = f(i_2)$, $i_{B_2} = f(i_2)$ при $n_1 = \text{const}$, $n_2 = \text{const}$, $u = \text{const}$.

3. Проанализировать вычерченные графики и дать заключение, насколько удачно подобраны генераторы для параллельной работы.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 268—270.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 553—556.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 303—304.

Работа № 29

ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы

1. Изучить конструкцию и схему универсального электродвигателя.
2. Установить зависимость скорости вращения якоря от величины подведенного напряжения постоянного или переменного тока при холостом ходе машин.
3. Снять рабочую характеристику электродвигателя при питании его постоянным или переменным током.

Основные теоретические положения

Для электроприводов малой мощности необходимы электродвигатели мощностью от нескольких ватт до полукиловатта, допускающих, в случае необходимости, широкое и плавное регулирование скорости вращения.

К числу подобных машин относятся электродвигатели серии УМТ и МУН-100/80 мощностью 5—100 *вт*.

Они являются универсальными коллекторными электродвигателями с последовательным возбуждением, УЛ мощностью 5—600 *вт*, а также приблизительно одинаковыми свойствами и рабочими характеристиками при питании их как от постоянного, так и от переменного напряжения стандартной, 50-периодной, частоты.

Универсальные коллекторные электродвигатели имеют такое же устройство, как и обычные машины постоянного тока, с той лишь разницей, что у них магнитная система возбуждения для уменьшения потерь собирается из шихтованной электротехнической стали.

На двух выступающих полюсах размещаются по две самостоятельные обмотки, соединенные последовательно с якорем электродвигателя (рис. 107).

При работе от сети переменного тока (зажимы 0 и ∞) в работе участвуют только две катушки возбуждения K_1 , сидящие на разных полюсах, а при присоединении электродвигателя к сети постоянного тока зажимами 0 и — две другие катушки K_2 вводятся дополнительно, последовательно с первыми.

Такая схема дает возможность использовать одну и ту же машину на обычные стандартные напряжения постоянного и переменного тока (110 и 127 в).

Якорь универсальных электродвигателей подобен якорю машин постоянного тока и снабжен нормальной якорной обмоткой и коллектором.

Скорость вращения универсальных электродвигателей

$$n \cong \kappa \frac{U}{\Phi_m}, \quad (1)$$

где κ — постоянный коэффициент для данной машины;

U — напряжение, подведенное к электродвигателю;

Φ_m — амплитуда магнитного потока.

Из выражения (1) видно, что изменением подводимого напряжения можно в широких пределах регулировать скорость вращения n .

С увеличением нагрузки на электродвигатель потребляемый ток, а вместе с ним и магнитный поток будут возрастать, в результате чего скорость вращения n будет резко снижаться, что является характерным для всех электродвигателей с последовательным возбуждением.

Таким образом, один и тот же тип электродвигателя может быть использован для различных условий работы, т. е. на разную скорость вращения и моменты при условии, что установленный для него режим не вызовет перегрева отдельных деталей выше допускаемых норм.

Значительные механические потери, имеющие место в универсальных коллекторных электродвигателях, позволяют пускать их без нагрузки, не опасаясь возможного разгона.

При холостом ходе скорость вращения n_0 возрастает в 2,5—4 раза по отношению к номинальной n_n , т. е.

$$n_0 = (2,5-4)n_n, \quad (2)$$

что не представляет опасности для целости якоря электродвигателя.

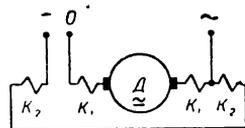


Рис. 107. Схема соединения обмоток универсального коллекторного электродвигателя.

Механические характеристики, показывающие зависимость изменения скорости вращения от момента на валу, т. е. $n = f(M)$, в универсальных электродвигателях оказываются все же различными при питании их постоянным и переменным током.

Это объясняется тем, что при питании переменным током создается значительное индуктивное падение напряжения и, кроме того, при малых скоростях вращения n возникает большой сдвиг по фазе между током и напряжением, из-за чего вращающий момент M резко падает.

Чем выше скорость вращения, тем совершеннее универсальность электродвигателя, т. е., тем ближе располагаются его характеристики $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ при питании как постоянным, так и переменным током.

Описание схемы установки

Для исследования свойств универсального коллекторного электродвигателя D предусматриваются две отдельные схемы для питания его постоянным (рис. 108) и однофазным переменным током (рис. 109).

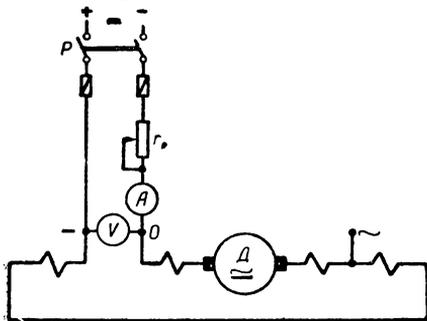


Рис. 108. Схема исследования универсального электродвигателя на постоянном токе.

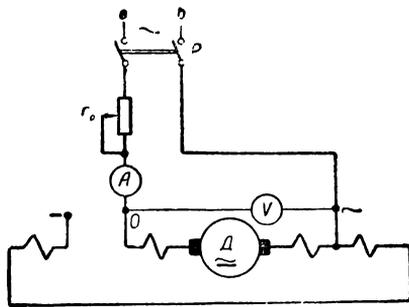


Рис. 109. Схема исследования универсального электродвигателя на однофазном токе.

Регулирование напряжения, подводимого к электродвигателю, в обеих схемах осуществляется при помощи регулировочного реостата r_p .

Механическая нагрузка на электродвигатель осуществляется при помощи ленточного тормоза.

Скорость вращения якоря измеряется при помощи тахометра.

Проведение опыта

1. Собрать схему исследования универсального электродвигателя на постоянном токе.

2. Полностью отпустить тормозную ленту и после проверки руководителем правильности соединений замкнуть двухполюсный рубильник P .

3. Изменять сопротивление регулировочного реостата r_p от его наибольшего значения до нуля и измерять тахометром скорость вращения якоря, как функцию напряжения, подведенного к электродвигателю при холостом ходе машины.

Результаты наблюдений представить таблицей.

№ опытов	Напряжение постоянного тока $U_0, в$	Скорость вращения якоря $n, об/мин$
1		
2		
3		
4		
5		
6		

4. Изменять силу натяжения тормозной ленты от нуля до значения, отвечающего потребляемому току $I = (1,1—1,2)I_n$, и при каждой установленной нагрузке измерять скорость вращения вала тахометром.

Во время испытания электродвигателя под нагрузкой необходимо регулировочным реостатом r_p поддерживать номинальное напряжение на его зажимах.

Результаты опытов представить таблицей.

№ опытов	Измерения на постоянном токе		
	Напряжение $U_0, в$	Ток $I, а$	Скорость вращения якоря $n, об/мин$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

5. Собрать схему исследования универсального электродвигателя на переменном токе и повторить опыты, описанные в пунктах 2, 3 и 4.

Результаты опытов свести в таблицы, аналогичные таблицам, приведенным в пунктах 3 и 4.

6. Составить перечень аппаратуры, использованной при исследовании универсального электродвигателя и записать его паспорт.

Обработка результатов испытания

1. Построить в одной координатной системе графики $n = f(U_0)$ и $n = f(U)$, выбрав для напряжений U постоянным и переменном токах один и тот же масштаб.

2. Построить в другой координатной системе графические зависимости $n = f(I_0)$ при $U_0 = \text{const}$ и $n = f(I)$ при $U = \text{const}$, выбрав для I_0 и I один и тот же масштаб.

3. Сопоставить свойства исследуемого электродвигателя при питании его постоянным и переменным токами.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, 1955, стр. 281—285.

РАЗДЕЛ 6

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Работа № 30

ИСПЫТАНИЕ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Цель работы

1. Изучить конструкцию и свойства двигатель-генератора.
2. Снять рабочие кривые в режиме внешней и регулировочной характеристик.
3. Определить номинальный к. п. д. и коэффициент мощности исследуемого агрегата.

Основные теоретические положения

Двигатель-генератор представляет собой двухмашинный преобразователь, состоящий из двух электрических машин, соединенных механически, но электрически не связанных между собой.

Одна из машин работает в режиме электродвигателя того тока, который подлежит преобразованию, а другая — в режиме электрогенератора генерируемого тока.

Отсутствие электрической связи между обеими электрическими машинами позволяет проводить необходимое регулирование величины полученного напряжения.

Для преобразования небольшой мощности трехфазного тока (до 50 кВт) в постоянный ток используют простой асинхронный электродвигатель трехфазного тока с короткозамкнутым ротором, а в качестве генератора — машину постоянного тока параллельного или смешанного возбуждения.

Первая берется при мало изменяющейся нагрузке, а вторая, как обеспечивающая относительную стабильность величины напряжения при изменении тока, — при переменной нагрузке.

Такой двигатель-генератор имеет относительно низкий коэффициент полезного действия, определяемый произведением к. п. д. обеих машин, сниженный коэффициент мощности в области малых нагрузок, большими габаритами, относительно высокой первоначальной стоимостью и наличием вращающихся частей, требующих присмотра и ухода.

Если генератор смешанного возбуждения постоянного тока работает всегда при практически неизменном напряжении, то в машине параллельного возбуждения при переменной нагрузке приходится все время поддерживать величину напряжения постоянного тока неизменной, путем регулирования магнитного потока полюсов генератора.

Таким образом, двигатель-генератор должен нормально работать в режиме регулировочной характеристики, при котором вручную или автоматически напряжение постоянного тока поддерживается стабильным.

Однако возможна работа и в режиме внешней характеристики, когда агрегат, будучи предоставлен самому себе, при изменении нагрузки будет давать переменное значение напряжения постоянного тока.

Кривые, показывающие изменение к. п. д. и $\cos \phi$ двигателя-генератора при переменной нагрузке со стороны постоянного тока, дают полную характеристику экономичности его работы и подчеркивают то обстоятельство, что при малых нагрузках работа подобных устройств протекает в весьма невыгодных условиях.

Примечание. Несмотря на всю простоту устройства подобных агрегатов, в настоящее время они успешно вытесняются ионными и полупроводниковыми выпрямителями.

Описание схемы установки

Преобразовательная установка, подлежащая исследованию (рис. 110), состоит из спаренных асинхронной машины трехфазного тока с короткозамкнутым ротором и машины постоянного тока с параллельным возбуждением, и предназначается для преобразования трехфазного тока в постоянный.

При испытании измеряют напряжение, ток и потребляемую мощность со стороны трехфазного тока, а также напряжение и ток со стороны постоянного тока.

Режим регулировочной характеристики осуществляется при помощи реостата r_p , находящегося в цепи возбуждения машины постоянного тока.

Проведение опыта

1. Собрать схему испытания двигателя-генератора, соединив обмотки статора асинхронного электродвигателя треугольником

или звездой в зависимости от величины напряжения сети и паспортных данных машины.

2. Установить однополюсными вилками трансформаторов тока необходимый коэффициент трансформации, затем замкнуть однополюсными вилками B первичные обмотки $Л1—Л2$ универсальных трансформаторов тока $ТТ$ накоротко, разомкнуть двухполюсный рубильник P_2 и после проверки схемы руководителем замкнуть трехполюсный рубильник P_1 .

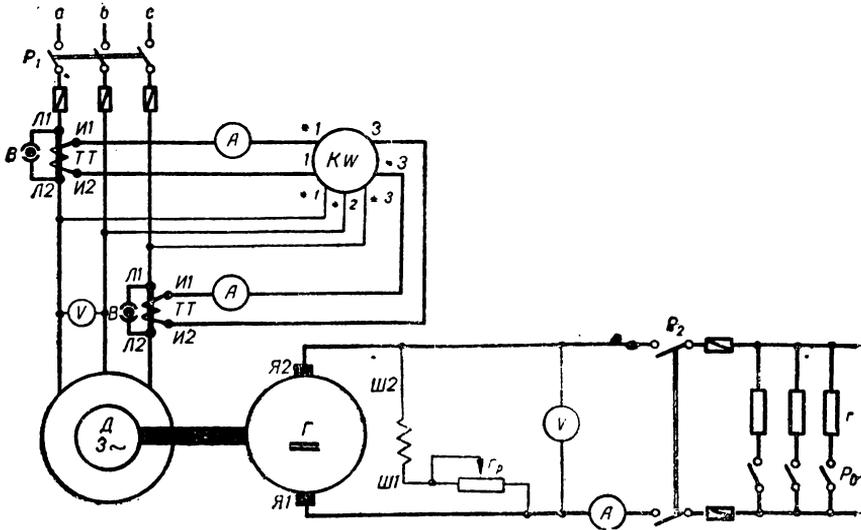


Рис. 110. Схема испытания двигатель-генератора.

3. Отрегулировать регулировочным реостатом r_p генератора постоянную величину напряжения, близкую к номинальному, вынуть однополюсные вилки B из гнезд, поставить их в соседние холостые гнезда и записать показания всех приборов.

4. Для снятия рабочих кривых в режиме внешней характеристики необходимо, не трогая на протяжении всего опыта реостат r_p , включить двухполюсный рубильник P_2 и, манипулируя однополюсными рубильниками P_0 , нагружать генератор токами, близкими к 25, 50, 75, 100 и 125% его номинального тока, и при каждой установленной нагрузке записывать показания приборов.

Примечание. Если во время опыта необходимо изменить коэффициент трансформации измерительных трансформаторов тока, то сначала замыкают однополюсными вилками B первичные обмотки $Л1$ и $Л2$ накоротко, а затем переставляют вилки, изменяющие коэффициент трансформации.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Электродвигатель трехфазного тока				Генератор постоянного тока		
	Напряжение $U, в$	Показания амперметров, a		Показания киловаттметров $P'_1, квт$	Коэффициент трансформации k	Напряжение $U_0, в$	Ток нагрузки I_0, a
		I'_1	I'_3				
1							
2							
3							
4							
5							
6							

5. Снять рабочие кривые двигателя-генератора в режиме регулировочной характеристики.

Для этого повторить опыты 4-го пункта с той разницей, что при каждом изменении нагрузки регулировочным реостатом r_p поддерживать величину напряжения генератора постоянного тока неизменной.

Результаты наблюдений представить таблицей, аналогичной той, которая приведена в 4-ом пункте.

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при испытании двигателя-генератора и записать паспорта машин.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех опытов: среднее значение линейного тока I , потребляемую мощность P_1 , коэффициент мощности $\cos \varphi$, отдаваемую мощность P_2 и коэффициент полезного действия агрегата η .

Результаты расчетов свести в таблицу.

2. Построить в одной координатной системе рабочие кривые двигателя-генератора: $I = f(P_2)$; $\cos \varphi = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$; $U_0 = f(P_2)$, работающего в режиме внешней характеристики, а в другой — эти же зависимости, но при работе агрегата в режиме регулировочной характеристики.

№ опытов	$U, в$	$I, а$	$P_1, кет$	$\cos\varphi$	$U_0, в$	$I_0, а$	$P_2, кет$	η	Примечания
1									Режим внешней характеристики
2									
3									
4									
5									
6									
1									Режим регулировочной характеристики
2									
3									
4									
5									
6									

3. Привести значение коэффициента мощности при холостом ходе агрегата и при номинальном режиме.

4. Найти номинальный к. п. д. двигателя-генератора.

Литература

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 304, 593.

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 276—277.

Работа № 31

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОЯКОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Цель работы

1. Изучить конструкцию и свойства одноякорного преобразователя.

2. Установить соотношения между напряжениями и токами со стороны контактных колец и коллектора.

3. Измерить стробоскопическим методом скорость вращения машины.

Основные теоретические положения

Одноякорный преобразователь отличается от машины постоянного тока наличием контактных колец, расположенных обычно на валу со стороны, противоположной коллектору, соединенных отпаями от обмотки якоря, находящимися на расстоянии $\frac{2\pi}{m}$ электрических градусов друг от друга, где m — число фаз многофазной системы переменного тока.

При вращении якоря такой машины приводным двигателем происходит самовозбуждение, и она может отдавать электроприемникам одновременно постоянный ток со стороны коллектора и переменный многофазный ток со стороны контактных колец (режим генератора двойного тока).

Если же, не приводя машину во вращение, подводить к ней электроэнергию с какой-либо из сторон, то она будет работать как двигатель-генератор, потребляя электроэнергию, с одной стороны, и отдавая ее, в случае надобности, с другой.

Таким образом, одноякорным преобразователем можно преобразовывать переменный ток в постоянный (режим преобразователя) или, наоборот, (режим инвертора), причем со стороны коллектора преобразователь будет работать как машина постоянного тока, а со стороны контактных колец — как синхронная машина многофазного тока.

Такая машина используется в большинстве случаев в режиме преобразователя, реже в режиме инвертора и только в специальных случаях в качестве генератора двойного тока.

Меньшая стоимость, более высокий коэффициент полезного действия, небольшая занимаемая площадь отличают одноякорный преобразователь от двухмашинного вращающегося преобразователя (двигателя-генератора).

Однако наличие электрической связи между контактными кольцами и коллектором приводит к определенным соотношениям между напряжениями и токами со стороны коллектора и контактных колец.

Так, при синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре машины имеют место следующие соотношения:

$$\frac{U}{U_0} \cong \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

и

$$\frac{I}{I_0} \cong \frac{2\sqrt{2}}{m}, \quad (2)$$

где U и I — эффективные значения напряжения и тока со стороны контактных колец;

U_0 и I_0 — напряжение и ток со стороны коллектора;
 m — число фаз.

Таким образом, при стандартном напряжении преобразуемого тока получается нестандартное напряжение преобразованного тока.

Это обстоятельство требует устанавливать со стороны контактных колец трансформатор с таким коэффициентом трансформации, при котором получаются стандартные величины с обеих сторон преобразовательной установки.

Неудобство определенного соотношения напряжений со стороны контактных колец и коллектора затрудняет регулирование напряжения получаемого тока, что является минусом однокорного преобразователя по сравнению с обычным двигателем-генератором.

Скорость вращения n однокорного преобразователя так же, как и в синхронной машине, связана с числом его полюсов $2p$ и частотой переменного тока f известным соотношением

$$n = \frac{60f}{p}. \quad (3)$$

Измерение скорости вращения n преобразователя без всяких дополнительных потерь удобно производить стробоскопическим методом.

Для этого на валу преобразователя укрепляется диск, разделенный попеременно на одинаковые белые и черные радиальные полосы, которые освещаются газоразрядной лампой, питаемой переменным током известной частоты f_0 .

Такой лампой может служить неоновая лампа, дающая две вспышки в течение каждого периода.

Если число черных (или белых) полос на диске будет $2p'$ и скорость вращения диска n окажется синхронной по отношению к частоте f_0 , то за половину периода диск повернется как раз на угол

$$\alpha = \frac{360}{2p'}, \quad (4)$$

равный углу между соседними черными полосами, и, в результате освещения в этот момент диска следующей вспышкой неоновой лампы, последний будет казаться наблюдателю неподвижным.

Скорость вращения диска, кажущегося наблюдателю неподвижным, а следовательно, и ротора преобразователя можно найти как

$$n = \frac{60f_0}{p'}. \quad (5)$$

Если скорость вращения диска будет немного ниже или выше синхронной по отношению к частоте f_0 , то последующая вспышка будет освещать размеченные полосы до того или после

того положения, которое отвечает синхронному, и наблюдателю будет казаться, что диск вращается против вращения машины или идет по ее ходу.

Описание схемы установки

Для проведения опыта собирать установку (рис. 111), состоящую из одноякорного преобразователя, у которого со стороны постоянного тока имеется двух-

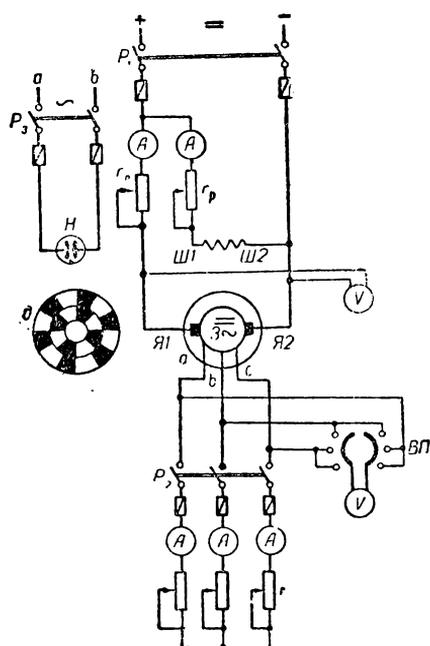


Рис. 111. Схема исследования одноякорного преобразователя.

освещенное неоновой лампой, будет казаться неподвижным.

Тот же эффект будет наблюдаться с другим, внешним, кольцом при скорости вращения ротора $n = \frac{60f_0}{p'+1}$ об/мин.

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией одноякорного преобразователя, записать число его полюсов $2p$ и число черных полюсов на внешнем $2p' + 2$ и на внутреннем $2p'$ кольцах.

2. Собрать схему одноякорного преобразователя со стороны постоянного и трехфазного тока, а также схему питания неоновой лампы.

3. Подготовить схему к пуску, для этого со стороны постоянного тока ввести полностью пускорегулировочный реостат r_n и вывести регулировочный r_p в цепи возбуждения, а со стороны трехфазного тока ввести полностью реостаты нагрузки r во всех трех фазах и выключить трехполюсный рубильник P_2 .

4. После проверки схемы руководителем включить двухполюсные рубильники P_3 и P_1 . Постепенно выводить пускорегулировочный реостат r_n до установления на коллекторе напряжения, близкого к номинальному, затем вводить регулировочный реостат r_p , и добиться установления скорости вращения ротора $n = \frac{60f_n}{p'+1}$, контролируя ее стробоскопическим методом при помощи диска d , освещаемого неоновой лампой H .

5. Измерить напряжение со стороны постоянного тока U_0 и со стороны трехфазного тока U_{12} , U_{23} , U_{31} при холостом ходе преобразователя, после чего включить трехполюсный рубильник P_2 и записывать показания всех приборов при равномерной нагрузке фаз до такого значения тока I , которое будет составлять 125—130% от его номинального значения.

В течение всего опыта поддерживать реостатами r_n и r_p неизменное напряжение на коллекторе U_0 и постоянную скорость вращения якоря $n = \frac{60}{p'+1}$ об/мин.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Скорость вращения якоря n , об/мин	Со стороны постоянного тока			Со стороны трехфазного тока					
		напряжения, в	токи, а		напряжения, в			токи, а		
		U_0	I_0	I_B	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
1										
2										
3										
4										
5										
6										

6. Измерить напряжения U_0 , U_{12} , U_{23} , U_{31} при скорости вращения $n = \frac{60f_n}{p}$ об/мин в режиме холостого хода и данные наблюдений внести в таблицу пункта 5-го.

7. Составить перечень всего оборудования, использованного при испытании с подробными его техническими характеристиками.

Обработка результатов испытания

1. Вычислить для двух произведенных опытов при холостом ходе отношение напряжений $\frac{U}{U_0}$ и для остальных опытов, произведенных при нагрузке, отношение токов $\frac{I}{I_0}$, взять соответственно их средние значения и сравнить с теоретическими значениями этих величин, после чего объяснить полученные отклонения.

2. Подсчитать для всех произведенных опытов подводимую мощность P_1 , отдаваемую P_2 , и коэффициент полезного действия преобразователя η , применив следующие соотношения:

$$P_1 = U_0 (I_0 + I_B), \quad (6)$$

$$P_2 = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}. \quad (8)$$

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	n , об/мин	U_0 , в	I_0 , а	I_B , а	P_1 , вт	U , в	I , а	P_2 , вт	η
1									
2									
3									
4									
5									
6									

3. Построить в одной системе координат кривые: $U_0 = f(P_2)$, $I_0 = f(P_2)$, $U = f(P_2)$, $I = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ при скорости вращения якоря $n = \frac{60f_0}{p'+1}$ об/мин.

4. Вычислить частоту трехфазного тока одноякорного преобразователя при установленных опытом двух скоростей вращения якоря

$$n = \frac{60f_0}{p'+1} \text{ и } n = \frac{60f_0}{p'}.$$

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 279—281.

Кулебакин В. С., Испытание электромашин и трансформаторов, ОНТИ, 1935, стр. 92—99, 354—373.

Работа № 32

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Цель работы

1. Изучить конструкцию асинхронного преобразователя частоты.

2. Снять рабочие характеристики и установить номинальные данные электрических величин, характеризующих работу преобразователя частоты.

3. Установить соотношение между мощностью, переданной ротору преобразователя вращающимся магнитным полем его статора, и мощностью, подведенной со стороны его вала.

Основные теоретические положения

Электроприводы с двигателями, скорость вращения которых значительно превышает предельную синхронную скорость, отвечающую стандартной частоте $f_1 = 50$ гц, равную 3000 об/мин, применяются в таких отраслях промышленности, как лесная, деревообрабатывающая, шелкопрядельная, авиационная и др.

В этих случаях применяются асинхронные электродвигатели, обмотки статора которых питаются трехфазным током повышенной частоты, большей частью $f_2 = 200$ гц.

Такой ток можно получить и от обычной трехфазной системы с $f_1 = 50$ гц, от специального преобразовательного устройства — асинхронного преобразователя частоты.

Последний преобразует трехфазный ток с частотой $f_1 = 50$ гц в трехфазный ток с частотой $f_2 = 200$ гц, а от него питаются электродвигатели, встроенные в ручной электрифицированный инструмент.

Асинхронный преобразователь частоты состоит из двух обычных асинхронных машин, из которых *I* имеет короткозамкнутый ротор, *II* — ротор с контактными кольцами

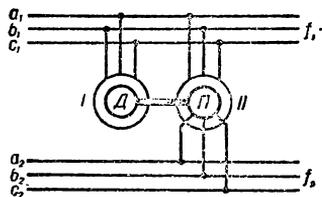


Рис. 112. Схема асинхронного преобразователя частоты.

В специальном изготовлении обе машины имеют общий вал и заключены в один кожух.

При неподвижном первичном электродвигателе I вращающееся магнитное поле статора машины II , пересекая обмотки статора и ротора, будет наводить в них э. д. с. E_1 и E_2 одной и той же частоты f_1 .

Следовательно, установка будет работать, как обычный трансформатор трехфазного тока с регулируемой, плавно изменяемой группой соединения его обмоток, несколько бóльшим, чем обычно, намагничивающим током и повышенными потерями, причем в системе a_2, b_2, c_2 частота трехфазной системы э. д. с. E будет $f_2 = f_1$.

Если приводной электродвигатель I вращает ротор машины II со скоростью n_2 , то частота генерируемой трехфазной системы э. д. с. E_2 в его обмотках станет иной f_2 из-за изменения относительной скорости вращения поля статора машины II по отношению к вращаемому ротору.

Так как относительная скорость вращения

$$n = n_1 \pm n_2, \quad (1)$$

где n_1 — скорость вращения поля статора машины II , равная

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p_2}, \quad (2)$$

p_2 — число пар полюсов обмотки статора машины II , то в системе a_2, b_2, c_2 будут наводиться э. д. с. E_2 частоты

$$f_2 = f_1 \left(1 \pm \frac{n_2}{n_1} \right), \quad (3)$$

причем знак плюс соответствует вращению ротора машины II против поля статора, а знак минус отвечает их согласованному вращению.

Так как асинхронный преобразователь применяется главным образом для повышения частоты, то в формуле (3) обычно пишут только один знак плюс.

При работе асинхронной машины с контактными кольцами II в режиме преобразователя частоты трехфазной системы э. д. с. и токов полная мощность цепи ротора $P_{2\text{полн}}$ складывается из электромагнитной мощности P_{12} , перенесенной вращающимся магнитным полем со статора на ротор, и мощности P'_2 , полученной в результате преобразования механической мощности, подведенной к ротору со стороны приводного электродвигателя I , т. е.

$$P_{2\text{полн}} = P_{12} + P'_2. \quad (4)$$

Таким образом, мощность трехфазной системы a_2, b_2, c_2 при частоте f_2 создается за счет преобразования мощности трехфазной системы a_1, b_1, c_1 при частоте f_1 , а также за счет мощности приводного электродвигателя I , который может питаться и от иной системы.

Как показывают теоретические исследования

$$\frac{P_{12}}{P_2'} = \frac{1}{\frac{f_2}{f_1} - 1}, \quad (5)$$

$$P_2' = P_{2\text{полн}} \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right), \quad (6)$$

$$P_{12} = P_{2\text{полн}} \frac{f_1}{f_2}, \quad (7)$$

$$f_2 = f_1 \left[1 + \frac{P_2}{P_1} (1 - s_1)\right], \quad (8)$$

где p_1 и p_2 — числа пар полюсов соответственно обмоток статоров приводного электродвигателя и асинхронного преобразователя частоты;

s_1 — скольжение ротора асинхронного электродвигателя I .

Об общих свойствах асинхронного преобразователя частоты судят по его рабочим кривым: $I_1 = F(P_2)$, $P_1 = F(P_2)$, $\cos \varphi_1 = F(P_2)$, $\eta = F(P_2)$ и $U_2 = F(P_2)$, $f_2 = F(P_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$, где величины с индексом 1 относятся к сети с частотой f_1 , а с индексом 2 — к сети с частотой f_2 .

Описание схемы установки

В схеме исследования асинхронного преобразователя частоты (рис. 113) предусмотрена электроизмерительная аппаратура, которой измеряют напряжение, частоту, токи и мощность со стороны сети со стандартной частотой $f_1 = 50$ гц.

Трехполюсные переключатели P_1 и P_2 позволяют производить измерения применительно к отдельным машинам D или P либо ко всей установке в целом.

В цепи повышенной частоты $f_2 = 200$ гц предусматривается аппаратура для измерения напряжения, частоты и токов в различных фазах.

Нагрузка на преобразователь осуществляется при помощи жидкостного реостата r .

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией асинхронного преобразователя частоты и собрать схему для его испытания.

2. Разомкнуть трехполюсный рубильник P_2 , поставить трехполюсные переключатели P_1 и P_2 в нижнее положение, установить на универсальных трансформаторах тока необходимый коэф-

эффициент трансформации, затем закорачивающие вилки B вставить плотно в средние гнезда и после проверки схемы руководителем замкнуть трехполюсный рубильник P_1 .

3. После того как агрегат начнет вращаться с установившейся скоростью, вынуть закорачивающие вилки B из гнезд, поставить их в соседние холостые гнезда и записать показания всех приборов в режиме холостого хода.

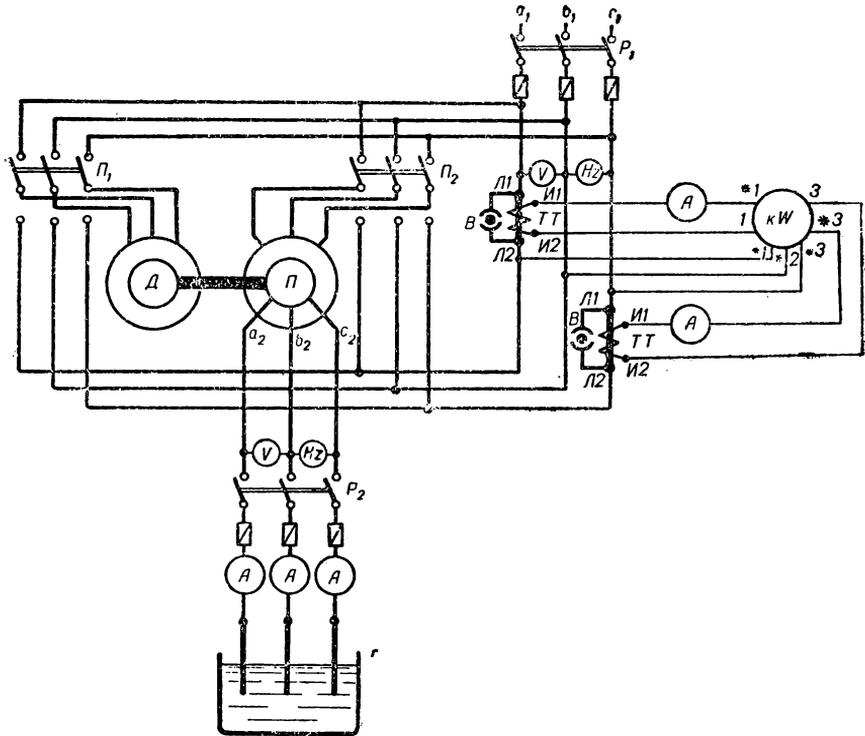


Рис. 113. Схема исследования асинхронного преобразователя частоты.

4. Замкнуть трехполюсный рубильник P_2 и, изменяя глубину погружения пластин в жидкость в нагрузочном реостате r , устанавливать нагрузку на преобразователь со стороны a_2, b_2, c_2 , равную 25, 50, 75, 100 и 125% номинального тока повышенной частоты, и записывать показания всех приборов.

Примечание. В случае необходимости изменения коэффициента трансформации измерительных трансформаторов тока следует сначала вставить короткозамыкающие вилки в средние гнезда, а затем переставлять вилки, изменяющие величину коэффициента трансформации.

Результаты опытов свести в таблицу.

№ опытов	Измерения со стороны 50 гц					Измерения со стороны 200 гц			Примечания			
	Напряжения $U_1, в$	Частота $f_1, гц$	Показания амперметров, a		Показания киловаттметра $P_1, квт$	Коэффициент трансформации k	Напряжение $U_2, в$	Токи, a				
			I_1'	I_3'				Частота $f_2, гц$		I_1''	I_2''	I_3''
1										Холостой ход		
2										Нагрузка		
3										" ~ 25%		
4										" ~ 50 "		
5										" ~ 75 "		
6										" ~ 100 "		
										" ~ 125 "		

5. Установить номинальный режим работы преобразователя и при помощи аппаратуры, находящейся в цепи с частотой 50 гц, измерить все указываемые ею величины применительно ко всей установке, приводному электродвигателю и непосредственно к статору преобразователя, обеспечивая проведение перечисленных трех режимов путем соответствующих переключений двух-трехполюсных переключателей P_1 и P_2 .

Результаты измерений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U_1, в$	Частота $f_1, гц$	Показания амперметров, a		Показания киловаттметра $P_1, квт$	Коэффициент трансформации k	Примечания
			I_1'	I_3'			
1							Измерение на агрегате
2							Измерение на приводном электродвигателе
3							Измерение на преобразователе

6. Составить перечень использованной аппаратуры и записать паспорт асинхронного преобразователя частоты.

Обработка результатов испытания

1. Подсчитать для всех произведенных опытов ток I_1 и мощность P_1 , потребляемые агрегатом, его коэффициент мощности $\cos \varphi_1$, величину отдаваемой мощности P_2 , а также коэффициент полезного действия установки η .

Результаты расчетов свести в таблицу

№ опытов	$U_1, \text{в}$	$f_1, \text{гц}$	$I_1, \text{а}$	$P_1, \text{квт}$	$\cos \varphi_1$	$U_2, \text{в}$	$f_2, \text{гц}$	$I_2, \text{а}$	$\eta P_2, \text{квт}$
1									
2									
3									
4									
5									
6									

2. Вычертить в одной координатной системе кривые: $I_1 = F(P_2)$, $P_1 = F(P_2)$, $\cos \varphi_1 = F(P_2)$, $\eta = F(P_2)$, а в другой — графические зависимости $U_2 = F(P_2)$, $f_2 = F(P_2)$ при $\cos \varphi_2 = 1$, и по ним определить номинальные данные величин, характеризующих работу преобразователя частоты.

3. Найти отношение мощности, потребляемой статором преобразователя P_n к мощности, потребляемой статором приводного электродвигателя P_d , при номинальном режиме агрегата и, сравнить его со значением, определенным из соотношения (5), объяснив причины расхождения между сравниваемыми величинами.

Литература

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 451—452.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРОНИКА

РАЗДЕЛ 7

Электронные и ионные приборы

Работа № 33

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Измерить статические прямое и обратное сопротивления выпрямителя, а также вычислить коэффициент выпрямления при различных напряжениях.
2. Построить вольтамперную характеристику селенового выпрямителя.
3. Составить рабочие кривые выпрямителя и найти номинальные значения величин, характеризующих его работу.

Основные теоретические положения

Переменный ток небольших мощностей порядка нескольких киловатт выпрямляют при помощи полупроводниковых выпрямителей.

Из существующих полупроводниковых выпрямителей (медно-закисных, сульфидных и селеновых) лучшими эксплуатационными и конструктивными данными обладают селеновые, хотя изготовить их значительно сложнее, чем другие.

В настоящее время освоены германиевые и кремниевые выпрямители, которые по своим свойствам значительно превосходят все прочие типы выпрямителей.

Селеновые выпрямители особенно целесообразно применять в области низких напряжений (единицы, десятки вольт) при

большом токе (до десятка тысяч ампер) или для высоких напряжений, достигающих до 500 кВ, при небольшом токе (десятки, сотни миллиампер).

Полупроводниковые выпрямители любого типа представляют собой объединенную систему проводящих и полупроводящих тел, сопротивление которой зависит от направления протекающего тока.

Каждый выпрямительный элемент выпрямителя состоит из слоя проводника 1, являющегося опорным электродом (катодом), поверхностный слой которого покрыт окисью металла 3 — полупроводником, к которому прижат металл 4 (анод), обеспечивающий контакт с полупроводниковым материалом (рис. 114).

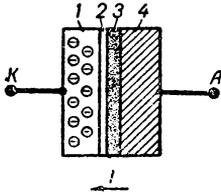


Рис. 114. Схема выпрямительного элемента полупроводникового выпрямителя.

Между слоями 1 и 3 образуется переходной, непроводящий слой 2 толщиной порядка 10^{-5} — 10^{-4} мм.

При подведении к зажимам K и A напряжения всего лишь в 1 в в переходном или запирающем слое образуется электрическое поле с большим градиентом потенциала порядка 10^5 — 10^6 в/см.

При такой величине градиента потенциала и положительном потенциале металла 4 свободные электроны, находящиеся в большом количестве в отрицательно заряженном слое 1 будут вырываться и через выпрямительный элемент потечет ток в направлении, противоположном потоку электронов, т. е. от точки A к точке K.

При обратной полярности на электродах A и K, когда поле в переходном слое будет стремиться вырвать электроны из полупроводника 3, ток течь почти не будет, так как слой 3 беден свободными электронами.

Таким образом, при одном направлении тока система, состоящая из выпрямительных элементов, оказывает относительно малое сопротивление $r_{пр}$, а при другом очень большое $r_{обр}$.

Первое сопротивление $r_{пр}$ называется прямым статическим сопротивлением выпрямителя, а второе $r_{обр}$ — обратным.

Отношение величин обратного статического сопротивления $r_{обр}$ выпрямителя к прямому $r_{пр}$, измеренных при одном и том же напряжении постоянного тока, называется статическим коэффициентом выпрямления и обозначается

$$\kappa = \frac{r_{обр}}{r_{пр}}. \quad (1)$$

У идеального выпрямителя $\kappa = \infty$, а у реальных — зависит от величины приложенного напряжения и температуры. При очень малых напряжениях (доли вольта), приходящихся на один вы-

прямоточный элемент, k измеряется десятками, а при больших значениях напряжения (единицы вольт) доходит до тысячи и даже десятков тысяч единиц в зависимости от типа выпрямителя.

При значительном повышении подводимого напряжения статический коэффициент выпрямления начинает уменьшаться вследствие снижения величины $r_{обр}$. При некотором значении напряжения запирающий слой 2 пробивается и выпрямительный элемент выходит из строя.

Во избежание порчи выпрямительных элементов не следует допускать обратных напряжений для меднозакисных и сульфидных выпрямителей свыше 5—7 в, для селеновых выпрямителей выше 14—18 в на элемент, прибегая, в случае необходимости, к последовательному их соединению.

Так как полупроводниковый выпрямитель не является линейным сопротивлением, то зависимость тока в прямом $I_{пр}$ и обратном $I_{обр}$ направлениях от величины подведенного к его зажимам постоянного напряжения U можно изобразить некоторой кривой $I = f(U)$.

Эта кривая, снятая при постоянной температуре выпрямителя $\vartheta = \text{const}$, называется статической вольтамперной характеристикой.

Наряду со статическим коэффициентом выпрямления k и статической вольтамперной характеристикой $I = f(U)$ выпрямителя, которая снимается на постоянном токе, существуют аналогичные динамические величины, получаемые при измерениях на переменном токе.

Экономичность работы выпрямительной установки с полупроводниковыми выпрямителями определяется ее к. п. д.

$$\eta = \frac{U_0 I_0}{P_1}, \quad (2)$$

где U_0 и I_0 — средние значения выпрямленного напряжения и тока, измеренные приборами магнитоэлектрической системы;

P_1 — мощность, потребляемая выпрямителем из сети переменного тока, измеренная при помощи ваттметра.

К. п. д. полупроводниковых выпрямителей зависит от качества выпрямительных элементов, схемы соединения, величины и характера нагрузки и находится обычно в пределах 0,4—0,85.

Наименьшее значение к. п. д. ($\eta = 0,4 - 0,5$) имеют сульфидные выпрямители, наибольшие (до $\eta = 0,85$) — селеновые.

Коэффициент мощности выпрямительной установки трехфазного тока находится из известного соотношения

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} UI}, \quad (3)$$

где U , I , P_1 — напряжение, ток и мощность, измеренные со стороны трехфазного тока.

Полупроводниковые выпрямители трехфазного тока обычно собираются по двухполупериодной мостовой схеме (рис. 115), предложенной А. Н. Ларионовым.

Питание выпрямителей осуществляется через трансформатор Tr . Между подводимым напряжением переменного тока U и средним значением выпрямленного постоянного тока U_0 существует определенная зависимость

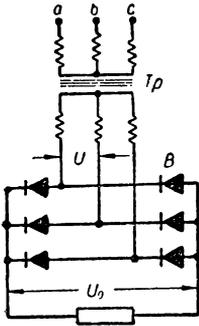


Рис. 115. Схема включения выпрямителей для двухполупериодного выпрямителя трехфазного тока.

$$\frac{U}{U_0} = 0,74. \quad (4)$$

Мостовая двухполупериодная схема при полупроводниковых выпрямителях особенно желательна, так как при ней наибольшее обратное напряжение, действующее между катодом и анодом в отрицательный полупериод, будет в два раза меньше, чем при других схемах, а именно:

$$U_{обр} = 1,05 U_0, \quad (5)$$

что объясняется прохождением тока по двум, последовательно соединенным плечам схемы.

Небольшая величина обратного напряжения $U_{обр}$ позволяет снизить число последовательно соединяемых выпрямительных элементов в каждом плече схемы n_n , которое находится из соотношения

$$n_n = \frac{U_{обр}}{U_{доп}}, \quad (6)$$

где $U_{доп}$ — допустимое напряжение на отдельный выпрямительный элемент.

При большом токе отдельные выпрямительные элементы или группы последовательно соединенных элементов приходится соединять параллельно.

Число параллельно соединенных элементов выбирается из тех соображений, чтобы они не перегревались сверх допустимой температуры, обусловливаемой плотностью тока и условиями охлаждения.

Перегрев выпрямительных элементов свыше допустимых норм вызывает преждевременное старение их и сравнительно быстрый выход из строя.

В частности, для меднозакисных выпрямителей плотность тока допускается: $j = 0,04-0,20$ а/см², а температура не выше $\vartheta = 50^\circ$; для сульфидных j до 10 а/см² и $\vartheta = 90^\circ$, а для селено-

вых выпрямителей $j = 0,04 - 0,16 \text{ а/см}^2$ и $\phi = 75^\circ$, причем более высокие значения плотностей тока относятся к случаям искусственного охлаждения выпрямительных элементов.

Описание схемы установки

Измерение статических сопротивлений производится по схемам, представленным на рис. 116 и 117 по методу вольтметра и амперметра.

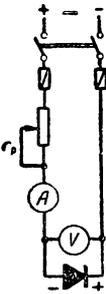


Рис. 116. Схема измерения прямого статического сопротивления полупроводникового выпрямителя.

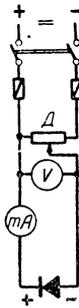


Рис. 117. Схема измерения обратного статического сопротивления полупроводникового выпрямителя.

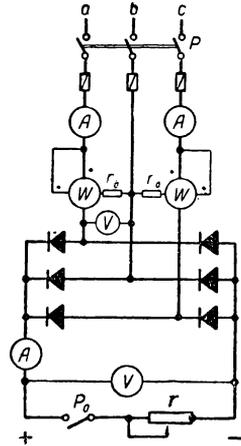


Рис. 118. Схема исследования работы полупроводникового выпрямителя трехфазного тока.

Определение прямого сопротивления $r_{пр}$ производится по схеме измерения «малых» сопротивлений, а обратного $r_{обр}$ — по схеме измерения «больших» сопротивлений.

Регулируемыми приспособлениями в приведенных схемах: реостатом r_p и делителем напряжения D можно изменять величину напряжения постоянного тока, подводимого к испытуемому селеновому столбику.

Выпрямитель трехфазного тока собран из шести одинаковых селеновых столбиков по схеме А. Н. Ларионова без трансформатора (рис. 118).

Приборами, включенными со стороны трехфазного тока измеряют: напряжение, токи и потребляемую мощность, а приборами постоянного тока — средние значения выпрямленных напряжения и тока.

Проволочный реостат с ползунок r является нагрузкой селенового выпрямителя, которая включается и выключается при помощи однопольного рубильника P_0 .

Проведение опыта

1. Собрать схему для измерения прямого сопротивления полупроводникового выпрямителя, ввести регулировочный реостат r_p полностью и *после проверки схемы руководителем* замкнуть двухполюсный рубильник P .

2. Записывать показания приборов при различных положениях ползунка реостата r_p , не допуская токов, превышающих номинальный ток селенового столбика больше чем на 20—25%, в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, \text{ в}$	Ток $I_{\text{пр}}, \text{ а}$
1		
2		
3		
4		
5		
6		

3. Собрать схему для измерения обратного сопротивления полупроводникового выпрямителя, поставить ползунок делителя напряжения D в такое положение, при котором напряжение, подведенное к выпрямителю равнялось бы нулю и *после проверки руководителем правильности собранной схемы* включить двухполюсный рубильник P .

4. Записать показания приборов при различных положениях ползунка делителя напряжения в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, \text{ в}$	Ток $I_{\text{обр}}, \text{ ма}$
1		
2		
3		
4		
5		
6		

5. Собрать схему выпрямителя трехфазного тока из шести селеновых столбиков со всей электроизмерительной аппаратурой для исследования его свойств в нагрузочных режимах.

6. После проверки схемы руководителем нагрузочный реостат r ввести полностью, однополюсный рубильник P_0 разомкнуть, замкнуть трехполюсный рубильник P и записать показания всех приборов.

7. Замкнуть однополюсный рубильник P_0 и, устанавливая нагрузочным реостатом r ток, близкий 25, 50, 75, 100 и 125% номинального тока выпрямителя, собранного по схеме А. Н. Ларионова, записывать показания приборов в таблицу.

№ опытов	Со стороны трехфазного тока					Со стороны постоянного тока	
	Напряжение $U, в$	Показания амперметров, a		Показания ваттметров, $вт$		Напряжение $U_0, в$	Ток I_0, a
		I_1	I_3	P_{12}	P_{32}		
1		0	0	0	0		0
2							
3							
4							
5							
6							

8. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при испытании полупроводникового выпрямителя и записать данные его паспорта.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех произведенных опытов величины прямого $r_{пр}$ и обратного $r_{обр}$ сопротивлений селенового столбика и вычертить графики $r_{пр} = f(U)$ и $r_{обр} = f(U)$, по которым найти коэффициент выпрямления k для различных значений напряжения и построить кривую $k = f(U)$.

2. Вычертить статическую вольтамперную характеристику $I = f(U)$ селенового столбика, выбрав масштаб для обратного тока в 1000 раз больше, чем для прямого.

3. Найти для всех случаев работы выпрямителя средний потребляемый ток I , подводимую мощность P_1 , коэффициент мощности $\cos \phi$, отдаваемую мощность постоянного тока P_0 и к. п. д. установки η .

Результаты расчетов представить в виде таблицы.

№ опытов	$U, \text{в}$	$I_1, \text{а}$	$P_1, \text{вт}$	$\cos \varphi$	$U_0, \text{в}$	$I_0, \text{а}$	$P_0, \text{вт}$	η
1		0	0			0	0	0
2								
3								
4								
5								
6								

4. Вычертить в одной координатной системе кривые: $I = f(I_0)$; $P_1 = f(I_0)$; $\cos \varphi = f(I_0)$; $U_0 = f(I_0)$ и $\eta = f(I_0)$ при $U = \text{const}$ и по ним найти номинальные данные всех перечисленных величин, т. е.: I_n , P_{1n} , $\cos \varphi_n$, U_{0n} , η_n .

5. Вычислить изменение величины напряжения ΔU_0 при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке по формуле

$$\Delta U_0 = \frac{U_{00}^* - U_{0n}}{U_{00}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где U_{00} и U_{0n} — напряжения соответственно при холостом ходе и номинальной нагрузке.

6. Подсчитать отношение $\frac{U}{U_{00}}$ и сравнить его с теоретическим значением этой величины, а также вычертить в масштабе форму кривой выпрямленного напряжения, т. е. $u_0 = f(t)$.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 117—123.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 619—622.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 501—503.

ИСПЫТАНИЕ ГАЗОТРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Изучить конструкцию и схему газотронного двухполупериодного выпрямителя однофазного тока.
2. Снять его характеристики при работе на переменную активную нагрузку.
3. Определить номинальные значения электрических величин, характеризующих работу выпрямителя.

Основные теоретические положения

Главной частью выпрямителя является газотронная лампа с двумя электродами.

Одним электродом служит накаливаемый до высокой температуры металлический катод, а другим — холодный токопроводящий анод.

Оба электрода находятся в стеклянном или металлическом баллоне, наполненном, после предельно достигнутого в нем вакуума, парами ртути или инертным газом (аргоном, неоном, гелием) при низком давлении порядка 10—30 мм рт. ст.

Лампы, содержащие внутри ртуть, называются ртутными газотронами в отличие от наполненных инертным газом, получивших название тунгаров.

Для накала нити газотронов применяется напряжение 2,5 или 5 в.

Качество катода газотронной лампы определяется его удельной эмиссией, т. е. величиной термоэлектронного тока в миллиамперах, который можно безвредно снимать с 1 см² его поверхности, экономичностью, определяемой величиной тока в миллиамперах, приходящегося на 1 вт мощности, затрачиваемой на нагрев катода, и продолжительностью срока его службы.

В ртутных газотронах катод представляет собой металлический стержень (кern), покрытый слоем окисей бария, стронция, кальция и подвергнутый в дальнейшем специальной термической и электрической обработке.

Такой оксидный катод работает при относительно невысокой температуре порядка 700—800°, достаточно экономичен (до 200 ма/вт) и относительно долговечен. Срок службы его около 1500—3000 час. (иногда до 5000 час.).

Оксидные катоды всегда должны эксплуатироваться при номинальном напряжении накала их нити. Перекал, а также недостаточный накал катода могут привести к потере эмиссии и даже к его полному разрушению.

В тунгарах отечественного производства типа ВГ-176 катод изготавливается в виде спирали из торированного молибдена.

Наличие в катодном небольшом количестве окиси тория требует сравнительно невысокой рабочей температуры порядка $1500\text{--}1600^\circ$ при довольно высокой экономичности, равной 200 ма/вт , и сроке службы около 1000 час.

Перед введением ртутного газотрона после длительного хранения в эксплуатацию для удаления с его катода амальгамы ртути с барием необходимо последний прогреть током в течение 1—3 час., не подавая при этом напряжения на анод.

В таком прогреве в течение 3—5 мин. перед каждым включением анодного напряжения нуждаются также и газотроны, находящиеся в нормальной эксплуатации.

Эта операция необходима для испарения находящейся внутри катода ртути и установления соответствующего давления ртутного пара.

Тунгары в этом отношении выгодно отличаются от ртутных газотронов, так как время разогрева их катодов перед работой составляет всего лишь 30—60 сек.

Аноды изготавливаются обычно из никеля, молибдена, стали, а в мощных газотронах из графита.

Во время работы лампы анод подвергается непрерывной бомбардировке электронов, вследствие чего температура его значительно повышается. В малых лампах естественное воздушное охлаждение предохраняет его от опасных перегревов, а в крупных газотронах приходится прибегать к искусственному воздушному дутью или водяному охлаждению.

Газотроны могут быть использованы как в однофазных, так и в многофазных схемах выпрямления переменного тока.

При выборе типа схемы следует принимать во внимание так называемую величину напряжения обратного зажигания $U_{обр}$ газотрона (пробивное напряжение), т. е. то наибольшее значение анодного напряжения, которое может выдержать лампа без нарушения ее односторонней проводимости.

Величина допустимого напряжения обратного зажигания зависит для данного газотрона от давления внутри баллона, являющегося функцией температуры газа или пара.

В частности, в ртутных газотронах температура катодной горловины должна быть $15\text{--}65^\circ$.

Тунгары, заполненные инертным газом, малочувствительны к изменению температуры, так как давление в них от нее почти не зависит.

В ртутных газотронах величина напряжения обратного зажигания $U_{обр} > 500\text{ в}$, а в лампах, заполненных инертным газом, $U_{обр} < 500\text{ в}$.

Поэтому ртутные газотроны применяются при выпрямлении более высоких напряжений, а тунгары являются низковольтными выпрямительными приборами.

Тунгары, выпускаемые нашей промышленностью, имеют как один (тип ВГ-222), так и два анода (типы ВГ-176 и ВГ-251), что дает возможность применять их для работы в однополупериодных и в двухполупериодных схемах выпрямления.

Включение газотрона Γ по двухполупериодной схеме однофазного тока (рис. 119) производится через трехобмоточный трансформатор, имеющий первичную обмотку I , питаемую переменным преобразуемым током, и две вторичные: II — со средней точкой O для подачи напряжения к обоим анодам A_1 и A_2 и III — со средней точкой o для нагрева катода K .

Данная схема обеспечивает выпрямление обеих полуволн тока благодаря наличию средней или нулевой точки O у вторичной обмотки $A_m - X_m$.

В течение одного полупериода потенциал точки A_m будет положителен по отношению к средней точке O , в это же время потенциал точки X_m будет отрицателен.

В течение другого полупериода потенциал точки X_m становится положительным, а потенциал точки A_m отрицательным по отношению к средней точке O , а следовательно, при включенной нагрузке r и по отношению к катоду K , который соединен с ней через сопротивление r и обмотку накала $a-x$.

В результате этого электроны, вылетающие из накаленной нити и образующиеся в заполняющей колбу среде, будут попеременно идти то к одному аноду, то к другому, обеспечивая этим постоянство направления тока через цепь нагрузки r .

Если не считаться с внутренним падением напряжения в газотроне, которое обычно составляет в ртутных газотронах 8—16 в и в газотронах с инертным газом 14—20 в, то среднее значение пульсирующего напряжения за период на нагрузке будет

$$U_0 = 0,898 U_2 \cong 0,9 U_2, \quad (1)$$

а среднее значение тока нагрузки

$$I_0 = \frac{U_0}{r}. \quad (2)$$

Так как в данной выпрямительной схеме существует определенная зависимость между величиной переменного напряжения U_2 , подводимого к анодам газотрона и получаемым напряжением постоянного тока U_0 , то это вызывает затруднение при регулировании величины U_0 , которое в практических условиях может быть достигнуто только изменением подводимого напряжения U_2 .

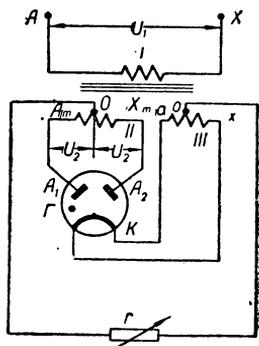


Рис. 119. Схема газотронного двухполупериодного выпрямителя однофазного тока.

В рассматриваемой двухполупериодной схеме величина напряжения обратного зажигания $U_{обр}$, определяемая наибольшей разностью потенциалов между катодом и не работающим в данный момент анодом, будет равна почти двойной амплитуде напряжения U_2 , т. е.

$$U_{обр} \cong 2\sqrt{2} U_2, \quad (3)$$

или, принимая во внимание соотношение (1), получим

$$U_{обр} \cong 3,14 U_0, \quad (4)$$

что следует иметь в виду при выборе типа газотрона, включенного в данную выпрямительную схему.

Работа газотронного выпрямителя протекает при определенных потерях, характеризуемых величиной к. п. д.

$$\eta = \frac{U_0 I_0}{P_1}, \quad (5)$$

где $U_0 I_0$ и P_1 — мощности соответственно со стороны выпрямленного и переменного токов.

Коэффициент мощности установки находится как

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}, \quad (6)$$

где P_1, U_1, I_1 — мощность, напряжение и ток со стороны переменного тока.

Для полной характеристики выпрямительного устройства рассматривают закон изменения напряжения выпрямленного тока U_0 , подводимой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$, коэффициента полезного действия η при переменной нагрузке, определяемой величиной выпрямленного тока I_0 , т. е. исследуют кривые $U_0 = f(I_0)$, $P_1 = f(I_0)$, $\cos \varphi = f(I_0)$, $\eta = f(I_0)$, которые получают опытным путем.

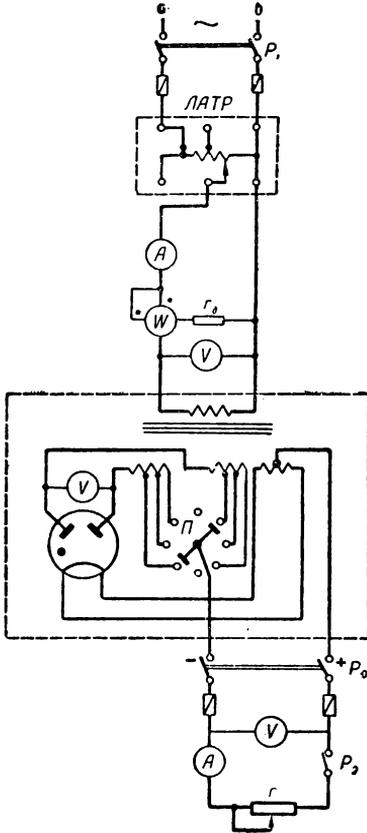


Рис. 120. Схема испытания газотронного выпрямителя однофазного тока.

Описание схемы установки

Для испытания газотронного выпрямителя однофазного тока (рис. 120), питающегося через регулировочный автотрансформатора

тор ЛАТР, в первичной цепи его трансформатора предусматривается аппаратура для измерения подводимых напряжения U_1 , тока I_1 и мощности P_1 .

Одна из вторичных обмоток трансформатора дает напряжение 2,5 в и обеспечивает питание нити катода, другая — состоит из двух совершенно одинаковых секций, которые подают переменное напряжение к анодам газотрона.

Специальным поворотным переключателем Π можно одновременно изменять число витков в обеих обмотках, что обеспечивает регулирование величины выпрямленного напряжения U_0 .

Вольтметр, включенный между анодами газотрона, измеряет двойное выпрямляемое напряжение переменного тока, т. е. $2 U_2$.

В цепи выпрямленного тока измеряют напряжение U_0 и нагрузочный ток I_0 , обуславливаемый величиной введенного нагрузочного сопротивления r .

Газотронная лампа типа ВГ-176, заполненная аргоном, имеет два анода и следующие номинальные данные:

напряжение накала	— 2,5 в;
ток накала	— 11 а;
время разогрева катода	— 30 сек.;
полное падение напряжения в газотроне	— 14 в;
среднее значение выпрямленного тока	— 6 а;
напряжение обратного зажигания	— 150 в;
срок службы	— 1000 час.

Проведение опыта

1. Собрать схему для испытания газотронного выпрямителя однофазного тока.

2. Поставить ползунок регулировочного автотрансформатора в нулевое положение, ползунок нагрузочного реостата r в положение, отвечающее его наибольшему сопротивлению, разомкнуть двухполюсный рубильник P_0 и однополюсный P_2 , затем поставить ручку переключателя числа витков трансформаторных обмоток Π в положение, отмеченное на шкале нулем.

3. После проверки схемы руководителем включить двухполюсный рубильник P_1 и постепенным перемещением ползунка регулировочного автотрансформатора установить и поддерживать на протяжении всего опыта номинальное напряжение на зажимах выпрямителя.

4. После разогрева катода (для газотрона типа ВГ-176 — 30 сек.) перевести ручку переключателя Π в крайнее правое положение, включить двухполюсный рубильник P_0 и записать отсчеты по всем приборам, отвечающие режиму холостого хода выпрямителя.

5. Замкнуть однополюсный рубильник P_2 и, изменяя величину сопротивления нагрузочного реостата r , записывать показания всех приборов, не допуская превышения выпрямленного тока

выше его номинального значения (для газотрона типа ВГ-176 среднее значение номинального выпрямленного тока до 6 а).

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Со стороны переменного тока			Со стороны постоянного тока		Расчетные величины		
	Напряжение, в		Ток I_1 , а	Мощность P_1 , вт	Напряжение U_0 , в	Ток I_0 , а	Кoeffициент мощности $\cos \varphi$	К. п. д. η
	$2 U_2$	U_1						
1					0			
2								
3								
4								
5								
6								

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при испытании газотронного выпрямителя и записать данные его паспорта.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех произведенных опытов величину коэффициента мощности $\cos \varphi$ и к. п. д. η и дополнить найденными значениями таблицу наблюдений.

2. Вычертить в одной координатной системе кривые $U_0 = f(I_0)$, $P_1 = f(I_0)$, $\cos \varphi = f(I_0)$, $\eta = f(I_0)$ и по ним найти номинальные данные всех перечисленных величин.

3. Определить соотношение между выпрямляемым напряжением переменного тока и средним значением выпрямленного напряжения при холостом ходе выпрямителя.

4. Вычертить в масштабе кривую выпрямленного напряжения ненагруженного выпрямителя, т. е. $u_0 = f(t)$.

5. Определить процентное изменение выпрямленного напряжения ΔU_0 при переходе от холостого хода к номинальной активной нагрузке.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 120—121, 302.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 604—607.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 485—486, 489—491.

ИСПЫТАНИЕ РТУТНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Изучить конструкцию и схему ртутного выпрямителя трехфазного тока.
2. Исследовать работу ртутного выпрямителя на переменную нагрузку.
3. Построить характеристики ртутного выпрямителя и найти номинальные значения электрических величин, характеризующих работу выпрямителя.

Основные теоретические положения

Ртутные выпрямители предназначаются для зарядки аккумуляторов, а также для питания нагрузок, требующих постоянного тока.

Они представляют собой ионные приборы, использующие мощный дуговой разряд в парах ртути.

Основной частью ртутного выпрямителя является колба, внутри которой установлено низкое давление порядка 10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст.

При небольшой мощности такие колбы изготовляют из молибденового стекла, а при значительных мощностях их выполняют в виде стальных сосудов, низкое давление внутри которых поддерживается специальной вакуумной установкой.

Стеклоянная ртутная колба (рис. 121), предназначенная для преобразования трехфазного тока в постоянный, состоит из конденсационного цилиндра 2, трех приваренных анодных рукавов 1, двух рукавов анодов возбуждения 3, одного отростка зажигающего анода 5 и нижней суженной части 4, в которую наливается ртуть.

В верхние части анодных рукавов 1 впаивают стальные, угольные или графитовые рабочие (главные) аноды, на которые подается выпрямляемый переменный ток, а в рукава 3 — аноды возбуждения (вспомогательные), выполненные из того же материала, что и главные аноды.

В отросток 5 впаивают стальную иглу, являющаяся пусковым или зажигающим анодом.

Нижняя часть колбы заполнена ртутью, служащей катодом выпрямителя.

Количество ртути берется из расчета 1—5 кг на каждые 100 а выпрямленного тока.

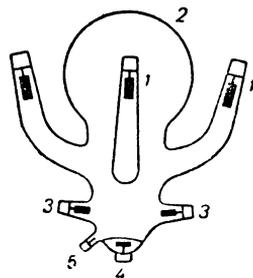


Рис. 121. Стеклянная колба ртутного выпрямителя трехфазного тока.

Все выводы колбы для придания им механической прочности снабжаются никелированными цоколями, прочно укрепленными на стеклянных отростках.

Такая колба подобно другим вентилям включается последовательно в цепь выпрямляемого тока и обладает свойством односторонней проводимости, пропуская полуволны переменного тока от анодов к жидкому катоду и запирая их при обратном направлении.

Следовательно, катод 4, присоединенный к потребителям постоянного тока, окажется для них положительным полюсом.

Ток в колбе проходит в виде дугового разряда между катодом и тем из анодов, который в данный момент имеет наиболее высокий положительный потенциал по отношению к нему. Когда потенциал соседнего анода станет выше, чем у работающего анода, дуга автоматически перейдет к нему и т. д., обходя за один полный период все аноды выпрямителя.

Таким образом, дуга является как бы гибким переключателем, создающим путь току от анодов к катоду только в одном направлении.

Для возникновения дугового разряда на поверхности ртути должно быть светлое так называемое катодное пятно с температурой около $200\text{--}500^\circ$, которое является источником излучения электронного потока.

Последнее первоначально образуется при помощи зажигательного анода, который при пуске ставят под небольшой потенциал по отношению к катоду, вызывая появление искры, способствующей возникновению катодного пятна и первоначальной ионизации паров ртути.

Плотность тока в катодном пятне доходит до 4000 а/см^2 .

Электроны, покидающие поверхность катода, устремляются к одному из анодов, встречая на своем пути молекулы ртути, вызывают их ионизацию, а образовавшиеся при этом положительные ионы под действием сил электрического поля, падая на поверхность катода, отдают ему свой заряд и энергию, поддерживая температуру катодного пятна.

Процесс сопровождается свечением ртутного пара ярким светло-фиолетовым цветом, увеличивающимся с возрастанием интенсивности ионизации.

Ярко светящееся катодное пятно, непрерывно перемещаясь по поверхности ртути со средней скоростью (около 10 м/сек), вызывает сильное ее испарение. Ртуть конденсируется на стенках колбы, отдает им свое тепло и снова стекает в нижнюю часть колбы на катод.

Таким образом, в ртутном выпрямителе катод не изнашивается, и срок службы ртутной колбы оказывается значительно выше, чем у газотрона.

Для хорошего охлаждения колбы под ней монтируют вентилятор, который приводится во вращение небольшим асинхронным

электродвигателем, включаемым одновременно с пуском выпрямительной установки.

Ртутные выпрямители со стеклянными колбами изготавливаются: низковольтные — на токи до 100 а при напряжении до 300 в и высоковольтные — на токи до 6 а при напряжении до 15 000 в и собираются обычно по трехфазной схеме с выведенной нулевой точкой трансформатора.

Металлические ртутные выпрямители изготавливаются: низковольтные — на токи до 6000 а при напряжении 600—800 в и высоковольтные — на токи до 100 а при напряжении до 11 000 в и собираются по шестифазной схеме выпрямления.

Во всех ртутных выпрямителях благодаря наличию электрической связи между цепями переменного и выпрямленного токов существует следующая зависимость:

$$U_0 = U\sqrt{2} \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m}, \quad (1)$$

где U_0 — среднее значение напряжения тока;

U — эффективное значение напряжения фазы трансформатора, питающего главные аноды;

m — число фаз.

В частности, при трехфазной схеме выпрямления соотношение (1) приобретает вид

$$U_0 = 1,17 U, \quad (2)$$

из которого видно, что при необходимости получить определенное напряжение выпрямленного тока U_0 , к главным анодам следует подвести вполне определенное фазное напряжение U , получаемое в выпрямительной схеме выбором соответствующего трансформатора (рис. 122).

В действительности на нагрузке r среднее значение напряжения выпрямленного тока получается несколько меньше, чем величина U_0 , найденная по формуле (2).

Это объясняется наличием падения напряжения в колбе ртутного выпрямителя ΔU , которое обычно составляет 15—30 в в зависимости от конструктивных размеров колбы, плотности ртутных паров и почти не зависит от величины нагрузки.

Следовательно, электроприемники окажутся под выпрямленным напряжением постоянного тока

$$U_0' = U_0 - \Delta U. \quad (3)$$

Зависимость напряжения U_0' от тока нагрузки I_0 называется внешней характеристикой ртутного выпрямителя и снимается

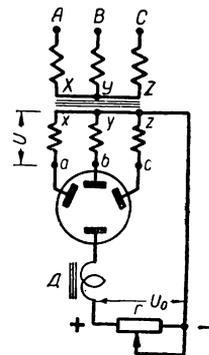


Рис. 122. Принципиальная схема ртутного выпрямителя трехфазного тока.

при постоянном значении подводимого напряжения U со стороны переменного тока.

К. п. д. выпрямительной установки

$$\eta = \frac{U_0 I_0}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4)$$

а коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_n I_n}, \quad (5)$$

где P_1 — подводимая мощность из сети переменного тока;

P_2 — отдаваемая мощность электроприемникам выпрямленного тока;

U_n и I_n — линейные напряжения и ток.

Указанные величины η и $\cos \varphi$ зависят от величины нагрузки, т. е. $\eta = f(P_2)$ и $\cos \varphi = f(P_2)$ и могут быть найдены экспериментальным путем.

Для сглаживания пульсации тока в цепь нагрузки включается дроссель D , в обмотках которого при изменении величины выпрямленного тока наводится э. д. с. самоиндукции, препятствующая резким изменениям тока I_0 , благодаря чему последний сглаживается.

Ртутный выпрямитель работает вполне устойчиво, пока ток нагрузки превышает 3—5 а.

При меньшей нагрузке вследствие быстрого охлаждения ртути мгновенно исчезает катодное пятно и действие выпрямителя прекращается.

Для поддержания катодного пятна при малых нагрузках применяется вспомогательная дуга, поддерживаемая между каждым анодом возбуждения и катодом.

Аноды возбуждения питаются от специального трансформатора однофазного тока Tr через дроссели D , а средняя точка его вторичной обмотки присоединяется к катоду (рис. 123).

Трансформатор возбуждения Tr одновременно используется при пуске выпрямителя для подачи

Рис. 123. Схема включения возбуждения и зажигания ртутного выпрямителя трехфазного тока.

потенциала на зажигаемый или пусковой анод.

При нажатии пусковой кнопки K с самовозвратом в исходное положение и качании колбы специальным маховичком ртуть, заливая пусковой анод, образует цепь зажигания, при разрыве

которой получается искра и начинается дуговой разряд между вспомогательными анодами и катодом, после чего кнопку *K* следует отпустить.

Добавочное сопротивление r_n служит для ограничения тока при пуске.

При подаче напряжения на главные аноды от трансформатора трехфазного тока и наличии нагрузки со стороны выпрямленного тока, включаемой между катодом и нейтральной точкой трансформатора, начинается поочередный дуговой разряд между каждым рабочим анодом и катодом, в результате чего дуга непрерывно с синхронной скоростью перебегаёт с одного анода на другой.

Если ток нагрузки не меньше 3—5 *a*, то для увеличения к. п. д. выпрямительной установки цепь анодов возбуждения (дежурное зажигание) совместно с трансформатором *Tr* может быть отключена.

При работе главные аноды выпрямителя могут разогреваться до темно-красного каления, т. е. до 700°.

При этом материал анода начинает расплываться и засорять ртуть катода.

Поэтому у колб, проработавших длительный срок (порядка нескольких тысяч часов), увеличивается внутреннее падение напряжения ΔU , зажигание их становится затруднительным и они выходят из строя.

При работе выпрямителя внутри колбы имеется большое количество положительных ионов, которые могут направиться к неработающим в данный момент анодам, создавая в их цепи обратный ток.

При неблагоприятных обстоятельствах может возникнуть дуга между анодами, имеющими наибольшую разность потенциалов.

Это явление, называемое обратным зажиганием, приводит к тяжелым авариям, так как при этом через выпрямительную колбу для питающего трансформатора создается режим короткого замыкания.

Чтобы избежать появления обратных зажиганий, следует хорошо охлаждать колбу, не допуская ее 10%-ной перегрузки свыше 10 мин. и 100%-ной — свыше 20 сек.

Описание схемы установки

Ртутный выпрямитель трехфазного тока типа ЗВН (рис. 124) смонтирован в металлическом шкафу, внутри которого находятся: автотрансформатор *A*, изменяющий напряжение переменного тока на такое, которое, будучи подведенным к главным анодам колбы, дает на выходе нужное напряжение выпрямленного тока; стеклянная колба, подвешенная на скобе, допускающей ее покачивание при помощи маховичка; трансформатор дежурного зажигания *Tr*; два дросселя вспомогательной цепи *d*; ограничитель-

ное сопротивление r_n ; дроссель D , находящийся в цепи выпрямленного тока и асинхронный электродвигатель D' , приводящий во вращение крылатку вентилятора.

На передней панели шкафа смонтированы один трехполюсный

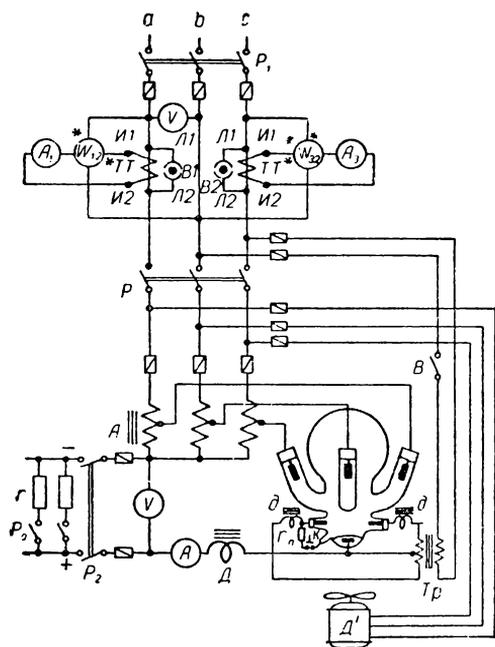


Рис. 124. Схема испытания ртутного выпрямителя трехфазного тока.

рубильник P и один двухполюсный P_2 — оба с задним выключением. Там же установлены: вольтметр V и амперметр A со стороны выпрямленного тока, а также маховичок для покачивания колбы, выключатель дежурного зажигания B' и пусковая кнопка K с самовозвратом в исходное положение.

Для проведения испытания ртутного выпрямителя со стороны выпрямленного тока предусматривается нагрузка в виде электрических плиток r , включаемых однополюсными рубильниками P_0 .

Со стороны трехфазного тока предусматривается электроизмерительная аппаратура для

определения величины подводимого напряжения, потребляемых токов и мощности, которая включается через универсальные измерительные трансформаторы тока $ТТ$.

3. Собрать недостающую часть схемы, включить рубильник P и P_2 , установить однополюсными вилками необходимый коэффициент трансформации универсальных трансформаторов тока, плотно вставить закорачивающие вилки B в средние гнезда и после проверки схемы руководителем замкнуть трехполюсный рубильник P_1 .

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией ртутного выпрямителя на месте установки и найти все детали, указанные в схеме.

3. Включить выключателем B' трансформатор дежурного зажигания Tr .

Затем взять правой рукой за маховичок, а левой нажать на пусковую кнопку K и осторожно наклонить колбу так, чтобы

ртуť катода залила зажигагельный анод, после чего вернуть колбу в нормальное положение.

При возвращении колбы в прежнее положение возникает искра, переходящая в дуговой разряд между вспомогательными анодами и катодом.

Если дуговой разряд не образовался, операцию следует повторить до получения необходимого эффекта, сопровождающегося появлением на поверхности ртути быстро перемещающегося катодного пятна.

4. Включить трехполюсным рубильником P автотрансформатор A и вентиляторный электродвигатель D , затем записать показания всех приборов, отвечающих режиму холостого хода ртутного выпрямителя.

Замкнуть двухполюсный рубильник P_2 и наблюдения производить при $I_0 \cong 25, 50, 75$ и 100% номинального выпрямленного тока установки.

Примечание. При производстве опытов и необходимости изменения коэффициента трансформации измерительных трансформаторов тока следует перед переключением соответствующих однополюсных вилок вставлять закорачивающие вилки B в средние гнезда приборов во избежание порчи последних.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Со стороны трехфазного тока					Со стороны постоянного тока		
	Напряжение $U_d, в$	Показания амперметров, a		Показания ваттметров, $вт$		Коэффициент трансформации K	Напряжение $U_0, в$	Ток $I_0, а$
		I'_1	I'_3	P'_{12}	P'_{32}			
1								0
2								
3								
4								
5								

5. Выключить выключателем B' дежурное зажигание, постепенно выключать однополюсными рубильниками P_0 нагрузку со стороны выпрямленного тока, записать то значение выпрямленного тока $I_{0\min}$, при котором затухнет дуга в колбе.

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при испытании ртутного выпрямителя, и записать данные его паспорта.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для каждого из произведенных опытов среднее значение линейных токов I_d , потребляемую мощность P_1 коэффициент мощности $\cos \varphi$, отдаваемую мощность P_2 и к. п. д. выпрямительной установки η , затем результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	$U_d, \text{в}$	$I_d, \text{а}$	$P_1, \text{квт}$	$\cos \varphi$	$U'_0, \text{в}$	$I_0, \text{а}$	$P_2, \text{квт}$	η
1								
2								
3								
4								
5								

2. Вычертить в одной координатной системе кривые: $U_d = f(I_0)$, $I_d = f(I_0)$, $\cos \varphi = f(I_0)$ и $\eta = f(I_0)$ и по ним найти значения всех этих величин, отвечающих номинальному выпрямленному току выпрямителя.

3. Привести значение наименьшего тока нагрузки $I_{0\text{min}}$, при котором еще возможна работа выпрямителя при выключенном дежурном зажигании.

4. Вычислить изменение величины выпрямленного напряжения ΔU при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке по формуле

$$\Delta U = \frac{U'_{0_0} - U'_{0_n}}{U'_{0_n}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где U'_{0_0} и U'_{0_n} — напряжения соответственно при холостом ходе и номинальной нагрузке выпрямителя.

5. Вычертить в масштабе кривую выпрямленного напряжения при холостом ходе установки.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 121—123, 304—309.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 610—618.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 497—501.

ИСПЫТАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ТИРАТРОННОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Цель работы

1. Изучить схему управляемого тиратронного выпрямителя однофазного тока.
2. Снять регулировочную характеристику тиратронного выпрямителя при холостом ходе.
3. Получить внешние характеристики выпрямителя, работающего на активную нагрузку при различных углах зажигания и найти его коэффициент мощности и к. п. д.

Основные теоретические положения

Основной частью управляемого тиратронного выпрямителя является газоразрядная лампа с накаливаемым катодом, в которой, кроме катода и анода, находится одна, а иногда и несколько дополнительных молибденовых или никелевых электродов — сеток.

Такая лампа получила название тиратрон.

Катод и анод тиратрона изготавливаются из тех же материалов и имеют такую же конструкцию, как и газотроны.

Тиратроны для небольших напряжений наполнены инертными газами, для высоких напряжений применяют ртутные тиратроны.

Рабочий процесс тиратрона не отличается по существу от процесса газотрона, новым является лишь воздействие сетки на разряд в лампе.

Подача на управляющую сетку отрицательного потенциала относительно катода приводит к затруднению возникновения ионизации газа в баллоне, так как поле сетки, направленное противоположно по отношению к полю анода, тормозит разгон электронов, вылетающих из разогретого катода.

Таким образом, чем больший отрицательный потенциал U_c будет подан на сетку, тем больший положительный потенциал потребуется на аноде U_a для ионизации пространства внутри баллона тиратрона.

То наибольшее отрицательное значение потенциала сетки U_c , при котором начинается дуговой разряд в тиратроне, называется критическим напряжением на сетке $U_{кр}$.

Последнее зависит от величины анодного напряжения U_a и может быть определено из пусковой характеристики тиратрона, которая представляет собой зависимость $U_{кр} = f(U_a)$ (рис. 125).

Как только внутри тиратрона начался разряд, прекратить его увеличением отрицательного смещения на сетку нельзя, так как сетка после этого теряет свое управляющее действие.

Последнее объясняется непрерывной нейтрализацией ее заряда ионами и электронами, заполняющими пространство дугового разряда. Снижение анодного напряжения до нуля или разрыв анодной цепи прекращает дуговой разряд в лампе.

В тиратронных выпрямителях на сетку лампы обычно подают переменное напряжение U_c , сдвиг фазы которого относительно переменного напряжения на аноде U_a можно изменять.

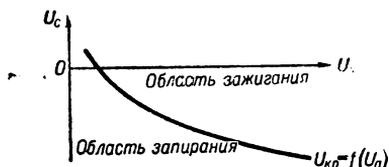


Рис. 125. Пусковая характеристика тиратрона.

Это выполняется при помощи фазорегулятора, представляющего собой асинхронную машину с контактными кольцами и заторможенным ротором, положение которого относительно статора определяет сдвиг фаз α между напряжениями с первичной и вторичной стороны.

Когда анодное напряжение U_a и напряжение на управляющей сетке U_c по фазе совпадают, тиратрон зажигается в начале каждого положительного полупериода и будет гореть до конца, а ток в цепи анода i_a будет протекать целый полупериод (рис. 126,а).

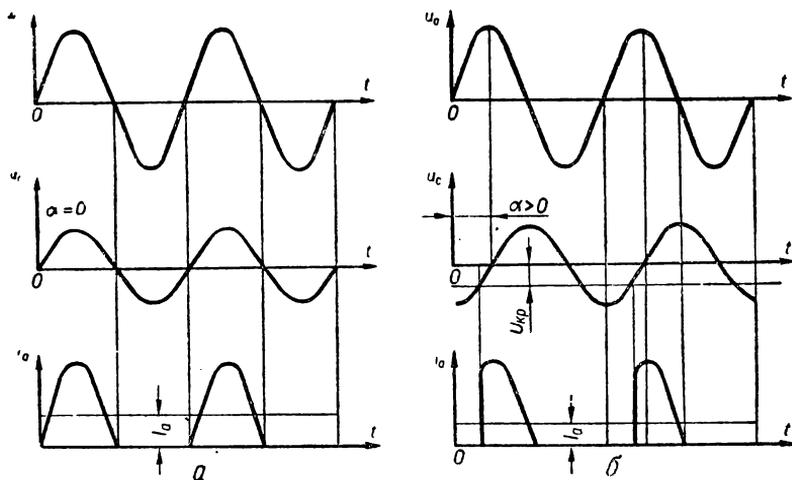


Рис. 126. Изменение напряжений на аноде и сетке тиратрона в зависимости от времени и кривая выпрямленного тока при однополупериодном выпрямлении и разных значениях угла зажигания α .

При этом форма выпрямленного тока i_a ничем не отличается от формы выпрямленного тока при газотроне, так как угол зажигания $\alpha = 0$.

При наличии сдвига фаз между U_a и U_c , определяемого углом зажигания $\alpha > 0$, вспышка тиратрона происходит при

Конденсатор C является простейшим фильтром для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

Электроизмерительными приборами, включенными со стороны переменного и выпрямленного токов, определяют ряд величин, характеризующих работу тиристорного выпрямителя.

Проведение опыта

1. Собрать схему для испытания управляемого тиристорного выпрямителя.

2. Ознакомиться с паспортом тиристора, выключить двухполюсный рубильник P_2 и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник P_1 .

3. Установить и поддерживать на протяжении всего опыта регулировочным автотрансформатором ЛАТР неизменное номинальное первичное напряжение U_1 .

После того как катод тиристора прогреется, приступить к снятию регулировочной характеристики в режиме холостого хода.

Для этого поворотом ротора фазорегулятора задавать углы зажигания в пределах от 0 до 180° и записывать соответствующие значения среднего выпрямленного напряжения U_0 .

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Угол зажигания α , град.	Среднее значение выпрямленного напряжения U_0 , в
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

4. Снять внешние характеристики тиристорного выпрямителя при трех различных значениях угла зажигания α и нагрузочном токе $I_0 \cong 0,25, 50, 75$ и $100\% I_n$, где I_n — номинальный ток тиристора.

Данные наблюдений представить таблицей.

№ опытов	Со стороны однофазного тока			Со стороны выпрямленного тока		Угол зажигания α , град.
	Напряжение $U_1, в$	Ток $I_1, а$	Мощность $P_1, вт$	Напряжение $U, в$	Ток $I, а$	
1					0	0
2						
3						
4						
5						
1					0	45
2						
3						
4						
5						
1					0	90
2						
3						
4						
5						

5. Составить перечень всей электроизмерительной аппаратуры, использованной при испытании тиратронного выпрямителя и записать паспортные данные тиратрона, трансформатора и фазорегулятора.

Обработка результатов испытания

1. Построить регулировочную характеристику тиратронного выпрямителя $U_0 = f(\alpha)$, работающего в режиме холостого хода.

2. Вычертить внешние характеристики выпрямительного устройства $U_0 = f(I_0)$ при углах зажигания $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$.

3. Построить кривые коэффициента мощности и к. п. д. тиристорного выпрямителя при разных углах зажигания в зависимости от величины выпрямленного тока.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 302—304.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 607—610.

Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 491—494.

Работа № 37

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

Цель работы

1. Ознакомиться со схемами и конструкциями электронных реле времени.

2. Изучить способ настройки реле на заданную выдержку времени.

3. Установить диапазон величины питающего напряжения, в пределах которого погрешность выдержки реле времени не превышает заданную величину.

Основные теоретические положения

Реле времени применяются в разнообразных схемах защиты, контроля и управления для получения выдержки времени, не зависящей от режимов самой схемы.

Электронное реле времени состоит из обычного электромагнитного реле и трехэлектродной лампы, выполняющей функции усилителя.

Трехэлектродная лампа представляет собой вакуумный сосуд с тремя электродами: анодом, катодом и расположенной между ними сеткой, которая позволяет довести усиление располагаемой мощности сигнала порядка $10^{-8} - 10^{-12}$ вт до 10^2 вт на выходе при времени срабатывания около $10^{-8} - 10^{-9}$ сек.

Следовательно, электронное реле времени, не потребляющее мощности управляющего сигнала, безынерционно и пригодно для работы в схемах, где действует весьма малая величина питающего напряжения. Помимо этого оно отличается точностью в работе, широким диапазоном уставок выдержки времени и

простотой настройки и применяется в различных схемах автоматики, заменяя собой контактные реле времени различных систем.

Одним из недостатков электронного реле времени является ограниченный срок службы электронных ламп (порядка 1000—2000 час.), что требует профилактической замены их во избежание отказа работы реле.

При наличии источника постоянного тока электронное реле времени может быть собрано по схеме, приведенной на рис. 128.

Если рубильник (контакт) K замкнут, конденсатор C , присоединенный к батарее смещения B_c , заряжен до напряжения U_{c0} , которое обеспечивает необходимое отрицательное значение потенциала на сетке, при котором анодный ток равен нулю.

При размыкании рубильника K отрицательный потенциал сетки начинает постепенно уменьшаться вследствие разряда конденсатора C на сопротивление r_c , а напряжение сеточного смещения U_c убывает по закону

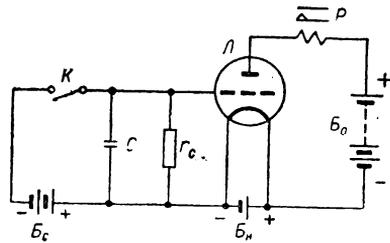


Рис. 128. Схема электронного реле времени при постоянном токе.

$$U_c = i_c r_c = U_{c0} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (1)$$

где i_c — разрядный ток конденсатора;

r_c — величина разрядного сопротивления;

U_{c0} — напряжение батареи смещения B_c ;

t — время;

T — постоянная времени, равная произведению $r_c C$.

Изменение сеточного смещения приводит к увеличению анодного тока, который через некоторый промежуток времени достигает тока срабатывания электромагнитного реле, обмотка которого находится в цепи анода.

Если обозначить величину напряжения на сетке электронной лампы, отвечающее анодному току срабатывания электромагнитного реле через U_{cp} , то время выдержки электронного реле будет

$$t_y = r_c C \ln \frac{U_{c0}}{U_{cp}}. \quad (2)$$

Таким образом, на время срабатывания существенно влияет величина постоянной времени

$$T = r_c C. \quad (3)$$

При больших значениях r_c и C увеличивается погрешность выдержек реле, так как при этом начинают сказываться проводи-

мости междуэлектродной изоляции электронной лампы и конденсатора. Поэтому предельные значения для r_c и C выбирают соответственно до 5—10 мгом и 20—30 мкф, что дает возможность получать выдержки реле времени порядка нескольких десятков секунд.

На промышленных предприятиях со сложными цепями транспортеров или системами элеваторных машин, включаемых по заданной программе, удобнее использовать электронное реле времени по схеме (рис. 129), которое работает на переменном токе без выпрямителя и сглаживающего фильтра.

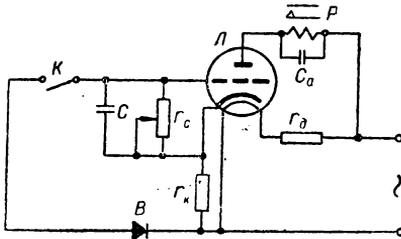


Рис. 129. Схема электронного реле времени на переменном токе.

В данной схеме в качестве усилителя и выпрямителя переменного тока используется электронная лампа. Так как при этом анодный ток содержит переменную составляющую, то для устранения вибрации контактов электромагнитного реле параллельно его катушке включен конденсатор C_a .

Запирающее напряжение при замыкании управляющего рубильника (контакта) K создается сопротивлением смещения, которое выполнено в виде постоянного r_k и переменного r_c сопротивлений, а также полупроводниковым выпрямителем B .

Сопротивление r_d служит для снижения напряжения, подводимого для нагрева катода лампы.

Так как на величину выдержки времени электронного реле переменного тока сказывается и величина питающего напряжения, то для цепей управления, где требуется повышенная точность выдержки времени, необходимо применять стабилизаторы напряжения.

Описание схемы установки

Электронное реле времени (рис. 130) питается через регулировочный автотрансформатор ЛАТР и имеет нормально открытые контакты P , которые при замыкании включают сигнальную лампу $ЛС$.

Накал электронной лампы типа 30П1С включен в сеть переменного тока через добавочное сопротивление $r_d = 300$ см, $r_c = 1,5$ мгом, $r_k = 1,3$ ком, $C = 30$ мкф, $C_a = 10$ мкф.

При нажатии на ключ K электронная лампа L запирается и н. о. контакты P отключают сигнальную лампу $ЛС$ от сети.

Размыкание контактов K вызывает через определенный промежуток времени срабатывание реле, в результате чего н. о. контакты P замыкаются и сигнальная лампа $ЛС$ загорается.

Проведение опыта

1. Собрать схему установки и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсный рубильник и установить регулировочным автотрансформатором номинальное напряжение, которое на протяжении всего опыта поддерживать неизменным.

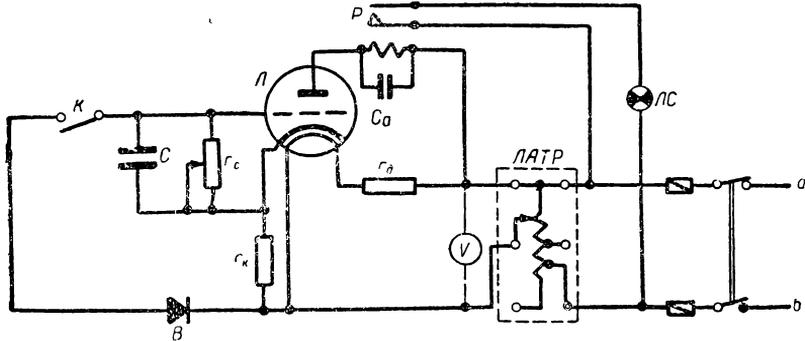


Рис. 130. Схема испытания электронного реле времени.

2. Спустя 30—40 сек., необходимых для разогрева катода до рабочей температуры, изменяя величину сопротивления r_c , проверить исправность работы реле по всему диапазону выдержек времени.

3. Приступить к градуировке реле, для этого нажимом ключа K запереть электронную лампу $Л$, затем отпустить его и, одновременно включив секундомер, определить время выдержки при установленном значении величины сопротивления r_c . Момент замыкания контактов реле определять по сигнальной лампе.

Наблюдения провести для всех делений лимба, которые нанесены на равном расстоянии друг от друга, и результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	№ делений лимба реле	Величина выдержки времени t_y , сек.
1		
2		
3		
4		
5		

4. Установить определенное значение величины сопротивления r_c и определить выдержку времени реле при напряжениях 75, 90, 100, 110, 125% от номинального.

Результаты опытов свести в таблицу.

№ опытов	Величина напряжения $U, в$	Выдержка времени $t_y, сек.$
1		
2		
3		
4		
5		

Обработка результатов испытания

1. Составить график зависимости величины выдержки времени от числа делений шкалы реле.

2. Рассчитать величины погрешностей выдержек реле времени при изменении питающего напряжения от 75 до 125% по формуле

$$\Delta t_y = \frac{t_{y_n} - t_y}{t_{y_n}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где t_{y_n} — выдержка времени при номинальном напряжении, затем результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Величина напряжения $U, в$	Погрешность $\Delta t_y, \%$
1		
2		
3		
4		
5		

3. Рассчитать максимальную величину выдержки исследуемого электронного реле времени при отсутствии токов междуэлектродной утечки и утечки в конденсаторе при $U_{c_0} = 30$ в и $U_{cp} = -5$ в.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 292—298.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 594—599.

Шляндин В. М., Элементы автоматики и телемеханики, Оборонгиз, 1954, стр. 186—204.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, 1951, ГЭИ, стр. 486—489.

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

РАЗДЕЛ 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Работа № 38

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Цель работы

1. Снять опытным путем механические характеристики асинхронной машины трехфазного тока с контактными кольцами при различных значениях активных сопротивлений в цепи ротора.

2. Изучить способы электрического торможения асинхронной машины трехфазного тока с контактными кольцами.

Основные теоретические положения

Механические характеристики $n = f(M)$ асинхронной машины имеют вид, представленный на рис. 131, и могут быть выражены уравнением

$$n = n_0 \left(1 - \frac{r_2 + r_{\partial}}{\kappa} M - \frac{x_2^2 s^2}{\kappa(r_2 + r_{\partial})} M \right), \quad (1)$$

где M — момент, развиваемый асинхронной машиной;
 n — скорость вращения ротора;

n_0 — скорость вращения магнитного поля статора, равная $\frac{60f}{p}$;

r_2 — активное сопротивление фазы ротора;

r_{∂} — дополнительное активное сопротивление, введенное в каждую фазу ротора.

x_2 — индуктивное сопротивление фазы неподвижного короткозамкнутого ротора при частоте тока, питающего обмотку статора;

s — скольжение;

κ — постоянная величина.

При достижении скольжением критического значения s_{κ} момент на валу машины становится наибольшим, критическим или опрокидывающим M_{κ} .

Величина этого момента для генераторного режима несколько больше, чем для режима электродвигателя, т. е.

$$M_{\kappa r} > M_{\kappa d}.$$

Для каждого режима она остается неизменной как для естественной (кривая 1), так и для всех искусственных механических характеристик (кривые 2 и 3).

Изменение величины активных сопротивлений в цепи ротора для получения различных искусственных механических характеристик сказывается лишь на изменении той скорости вращения ротора, при которой наступает явление опрокидывания.

При работе асинхронной машины не исключается возможность ее кратковременной перегрузки, величина которой в каждом отдельном случае определяется допустимым тепловым режимом и отношением $\frac{M_{\kappa}}{M_H}$, которое для современных асинхронных машин мощностью от 0,6 до 100 квт устанавливается ГОСТ 186—52 от 1,7 до 2,2.

Рассматривая работу асинхронной машины в режиме электродвигателя, видим, что величина скольжения обычно изменяется в пределах $s = (1-10)\%$, то величиной $x_2^2 s^2$ в уравнении (1) можно пренебречь ввиду ее малости.

Тогда в пределах изменения момента $M = 0-1,5 M$ естественную и искусственные механические характеристики можно считать прямыми линиями (рис. 132), определяемыми уравнением

$$n = n_0 \left(1 - \frac{r^2 + r_{\partial}}{\kappa} M \right). \quad (2)$$

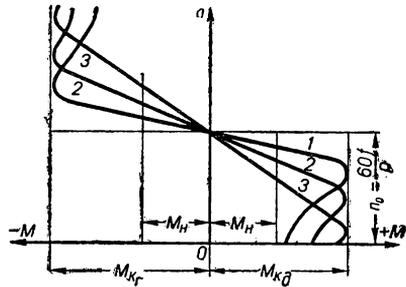


Рис. 131. Механические характеристики асинхронной машины трехфазного тока при различных значениях активных сопротивлений в цепи ротора.

Тормозные режимы асинхронных машин могут быть осуществлены как переменным, так и постоянным током.

Применяя переменный ток, различают три способа торможения: генераторное с отдачей электроэнергии в сеть, противовключением и торможение при однофазном включении.

При постоянном токе используют динамическое торможение, когда асинхронная машина переводится в режим синхронного генератора.

Генераторное торможение с отдачей электроэнергии в сеть возможно только при вращении ротора электродвигателя со скоростью $n > \frac{60f}{p}$, т. е. со сверхсинхронной скоростью.

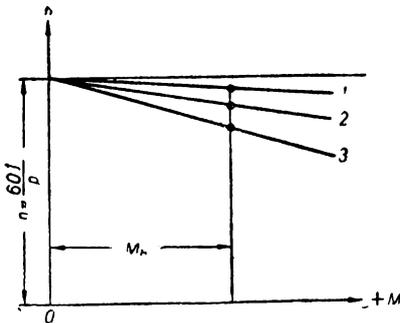


Рис. 132. Естественная и искусственные механические характеристики асинхронного электродвигателя трехфазного тока при нормальной работе.

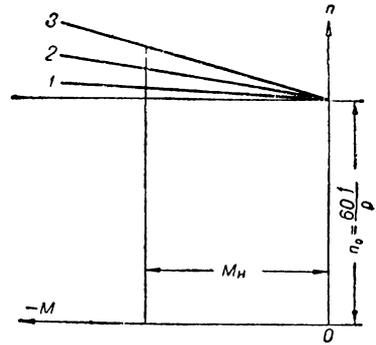


Рис. 133. Естественная и искусственные механические характеристики асинхронной машины трехфазного тока при торможении на сверхсинхронных скоростях.

Этот способ имеет место при переключении числа пар полюсов с меньшего на большее, что встречается в схемах, обеспечивающих точную остановку подъемников, или в тех случаях, когда ротор электродвигателя под влиянием внешней силы, например, спускающегося груза крана, начинает вращаться со скоростью выше синхронной $n_0 = \frac{60f}{p}$.

При переходе через синхронную скорость вращения величины э. д. с. и тока в роторе скольжение и вращающий момент изменяют свой знак на противоположный и асинхронная машина автоматически без всяких переключений переходит на генераторный режим.

На рис. 133 представлены естественная и искусственные характеристики для тормозного режима с отдачей электроэнергии в сеть.

Из тормозных характеристик видно, что введение активных сопротивлений в цепь ротора при вполне определенном значении момента на валу машины приводит к возрастанию скорости вращения ротора.

Наименьшая скорость вращения будет при работе на естественной характеристике.

Этот способ торможения часто используется в грузоподъемных кранах для ограничения скорости спуска, причем в некоторых случаях, изменяя величину активных сопротивлений в цепи ротора, доводят скорость вращения до величины, близкой к двойной синхронной скорости.

Торможение с отдачей электроэнергии в сеть выгодно с экономической точки зрения, но не может быть осуществлено при скоростях вращения ротора ниже синхронной скорости $n_0 = \frac{60f}{p}$.

Торможение противовключением состоит в том, что электродвигатель включается для вращения в направлении, обратном тому, в котором вращается ротор (или его вращает связанный с ним исполнительный механизм).

В результате этого получается весьма эффективное торможение, которое может быть использовано для уменьшения времени выбега электрифицированного агрегата или для быстрого установления желаемой скорости, например, при спуске грузов в кранах.

Обычно при торможении противовключением для ограничения всплеска тока в цепи ротора вводятся значительные сопротивления.

На рис. 134 показано определение величины тормозного сопротивления, которое необходимо ввести в цепь ротора, для ускорения остановки механизма при торможении противовключением.

На момент реверсирования скорость вращения n останется той же, которая соответствовала режиму электродвигателя (точка A , рис. 134).

Этой величиной n и заданным тормозным моментом M_T определится точка B , которая должна лежать на искусственной тормозной характеристике, исходящей из точки $-n_0$. Соединив эти две точки, получим такую характеристику, по которой будет работать машина до полной остановки (точка K).

В момент прекращения вращения во избежание вращения в обратную сторону электродвигатель необходимо немедленно отключить от электросети.

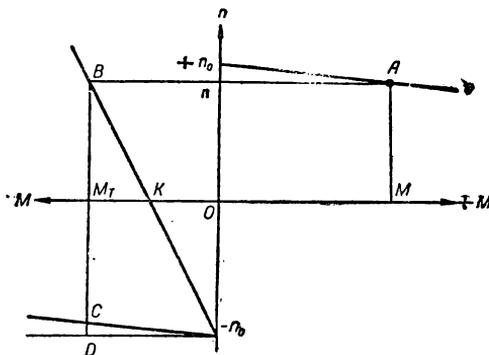


Рис. 134. Определение величины тормозного сопротивления для ускорения остановки механизма при торможении противовключением.

Величина необходимого тормозного сопротивления определяется отрезком BC , масштаб для которого находится при помощи отрезка CD , представляющего собой величину, пропорциональную сопротивлению одной фазы обмотки ротора при условии, что прямая $— n_0C$ является естественной характеристикой электродвигателя при вращении в противоположную сторону.

Торможение противовключением возможно при всех значениях скорости, но не экономично из-за значительных тепловых потерь в тормозных сопротивлениях, но все же оно находит применение в грузоподъемной технике для ускорения остановки механизмов передвижения мостов и тележек, а также для получения небольших регулируемых скоростей спуска.

Торможение при однофазном включении (рис. 135), применяемое в крановых установках, заключается в том, что одна фаза статора отключается от сети и присоединяется к любой из двух других фаз, а в цепь ротора, принудительно вращаемого со стороны исполнительного механизма, например, за счет опускающегося груза, вводятся значительные активные сопротивления.

Возникновение тормозного эффекта обусловливается взаимодействием пульсирующего магнитного поля статора с индуктированными токами в обмотках ротора. При соответствующем подборе активных сопротивлений в цепи ротора можно получить серию механических характеристик, исходящих из начала координат и имеющих опрокидывающий момент M'_k , не превышающий 33% от номинального момента M_n .

Как видно из рис. 135, при одном и том же тормозном моменте M_t наименьшая скорость будет при работе с меньшими сопротивлениями цепи ротора (кривая 1), а при введении дополнительных сопротивлений в цепь ротора скорость будет возрастать (кривые 2 и 3).

Торможение при однофазном включении возможно при скоростях вращения как ниже, так и выше синхронной скорости

$$n_0 = \frac{60f}{p}$$

Динамическое торможение асинхронных машин происходит при отключении обмоток статора от сети трехфазного тока и присоединении их к источнику постоянного тока по одной из схем, представленных на рис. 136. Ротор замыкается при этом на некоторое активное сопротивление.

При этом способе торможения обмотки статора создают неподвижное в пространстве магнитное поле, которое возбуждает в обмотках вращаемого ротора э. д. с. и точки, т. е. машина,

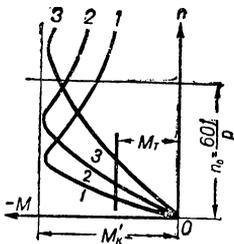


Рис. 135. Механические характеристики асинхронной машины, включенной по однофазной схеме.

превращается в синхронный генератор с неподвижными магнитными полюсами. Взаимодействие магнитного поля с токами в роторе создает тормозной момент, величина которого зависит от намагничивающей силы статора, величина сопротивления цепи ротора и скорости вращения машины.

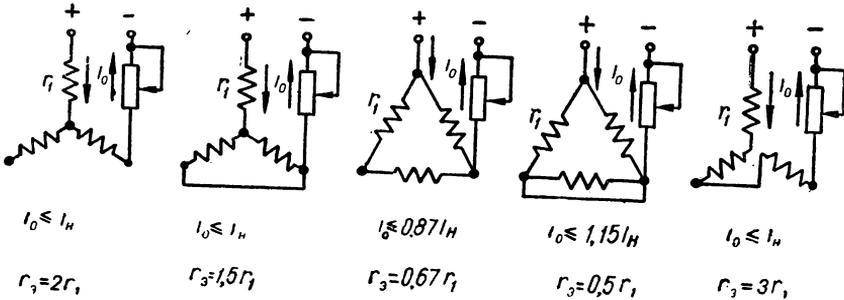


Рис. 136. Схемы включения обмоток статора асинхронных машин трехфазного тока на постоянный ток при динамическом торможении.

Механические характеристики при динамическом торможении приведены на рис. 137. Они проходят через начало координат, так как при скорости, равной нулю, тормозной момент будет отсутствовать.

Величина критического момента M''_k возрастает при увеличении напряжения, подведенного к статору, но не зависит от величины сопротивления, вводимого в ротор. Последнее только определяет величину скорости, соответствующую критическому моменту.

В грузоподъемных машинах регулирование скорости спуска груза осуществляется изменением величины сопротивления в цепи ротора, причем малые скорости спуска груза будут отвечать работе при небольших активных сопротивлениях в цепи ротора.

Динамическое торможение асинхронных машин трехфазного тока применяется не только в крановых схемах, но и в других видах электрооборудования.

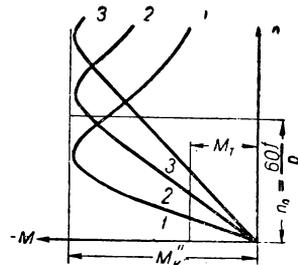


Рис. 137. Механические характеристики асинхронной машины трехфазного тока при динамическом торможении.

Описание схемы установки

Экспериментальная установка (рис. 138) состоит из: испытуемого асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами D , сидящей с ним на одном валу машины

постоянного тока с независимым возбуждением Γ , якорь которой соединен с якорем аналогичной ей машины Γ' , на валу которой находится асинхронная машина трехфазного тока с короткозамкнутым ротором \mathcal{D}' .

Электрические машины Γ , Γ' , \mathcal{D}' являются вспомогательными устройствами и дают возможность снять все механические характеристики $n = f(M)$ асинхронного электродвигателя \mathcal{D} .

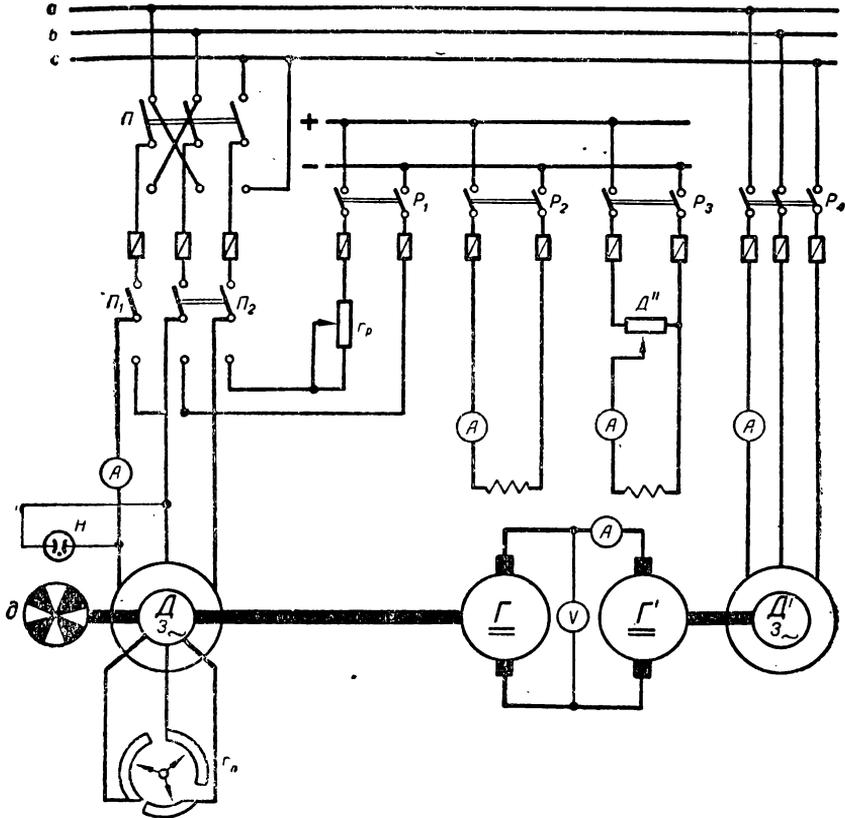


Рис. 138. Схема для снятия механических характеристик асинхронной машины трехфазного тока с контактными кольцами.

В данной схеме эти машины могут быть поставлены как в режим генератора, так и в режим электродвигателя, создавая соответственно тормозные или вращающие моменты.

Однополюсный Π_1 и двухполюсный Π_2 переключатели, находящиеся в цепи статора асинхронного электродвигателя \mathcal{D} , дают возможность осуществить специальные тормозные режимы.

При установке в нижнее положение однополюсного переключателя Π_1 получается схема торможения при однофазном

включении, а при одновременном переключении обоих переключателей P_1 и P_2 — схема динамического торможения при питании обмоток статора постоянным током.

Амперметры, находящиеся в цепях статоров асинхронных машин D и D' , служат для контроля нагрузки их обмоток протекающими токами.

Приборы, находящиеся в цепи постоянного тока (вольтметр и амперметр), позволяют определить мощность, циркулирующую между машинами G и G' , зная которую и потери в машине G , а также скорость ее вращения, вычислить момент испытуемого асинхронного электродвигателя D .

Неоновая лампа H совместно с освещаемым ею стробоскопическим диском d позволяет определить знак скольжения асинхронной машины D .

Проведение опыта

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой, проверить правильность выполненного монтажа и работоспособность отдельных ее частей. Для этого необходимо проверить согласованность направления вращения асинхронных машин D и D' .

Последнее производят следующим образом: пускают асинхронный электродвигатель D' , подают напряжение на обмотки возбуждения машин G и G' и замечают направление вращения асинхронной машины D' .

Затем размыкают двухполюсные рубильники P_2 и P_3 и включают переключатели P_1 , P_2 и затем P в верхние положения.

Если направление вращения асинхронной машины D' осталось прежним, то приступают к проведению испытания, в противном случае необходимо предварительно реверсировать машину D' .

После произведенной проверки отключить всю установку от сети.

2. Приступить к снятию механических характеристик режима генераторного торможения с отдачей электроэнергии в сеть и режима электродвигателя.

Для этого включить асинхронную машину D' и обмотки возбуждения машин G и G' , установив предварительно наименьший ток возбуждения машины постоянного тока G' .

Постепенно увеличивая возбуждение машины G' , разогнать агрегат, состоящий из машин D и G , до синхронной скорости вращения n_0 (при этом кажущаяся скорость вращения стробоскопического диска d , освещаемого неоновой лампой H , будет равна нулю), после чего включить асинхронную машину с контактными кольцами D в сеть трехфазного тока.

При этом машина D будет находиться в режиме синхронного холостого хода.

Для снятия естественной характеристики тормозного режима необходимо полностью вывести реостат в цепи ротора, постепен-

ным увеличением возбуждения машины Γ' перевести испытуемую машину D в генераторный режим, добившись такого значения отрицательного скольжения (кажущееся направление вращения стробоскопического диска, освещаемого неоновой лампой, должно соответствовать направлению вращения ротора), при котором она работала бы при токе $I = 1,25 I_n$, где I_n — номинальный ток ее статора.

Затем постепенно уменьшать возбуждение машины Γ' и записывать показания приборов постоянного тока, а также скорость вращения ротора до тех пор, пока агрегат не достигнет синхронной скорости вращения (стробоскопический диск неподвижен).

При этом режиме машина Γ' работает генератором, а машины Γ и D' — электродвигателями.

Дальнейшее ослабление поля машины Γ' приведет к еще большему снижению напряжения, подводимого к якору машины Γ , и она перейдет в генераторный режим, а испытуемая асинхронная машина D — в режим электродвигателя. Что касается машин Γ' и D' , то первая будет работать в режиме электродвигателя постоянного тока, а вторая — асинхронным генератором, отдающим активную электроэнергию в сеть.

При испытании машины D в двигательном режиме необходимо измерять те же величины, что и при снятии механических характеристик тормозного режима и обратить внимание на кажущееся направление вращения стробоскопического диска δ , освещаемого неоновой лампой H .

Порядок снятия искусственной характеристики ничем не отличается от снятия естественной характеристики.

Результаты опытов представить таблицей.

№ опытов	Скорость вращения n , об/мин	Напряжение U_0 , в	Ток I_0 , а	Наименование режима	Примечание
1				Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть	Естественная характеристика
2					
3				Синхронная скорость	
4					
5				Двигательный режим	
6					

Примечание. Результаты опытов по снятию искусственной характеристики заносят в аналогичную таблицу, причем в последней графе отмечается величина фазного активного сопротивления r_δ , вводимого в цепь ротора.

3. Определить время торможения асинхронной машины D по схеме *противовключения*.

Для этого при *полностью введенном* сопротивлении в цепи ротора переключателем Π включить электродвигатель в сеть трехфазного тока. Когда скорость вращения агрегата примет установившееся значение трехполюсный переключатель Π поставить в другое положение и *одновременно пустить секундомер*.

Из-за изменения направления вращения магнитного поля статора ротор быстро затормаживается.

В момент остановки ротора надо остановить секундомер и записать его показание.

4. Снять механическую характеристику асинхронной машины D , включенной по *однофазной схеме*.

Для этого поставить однополюсный переключатель Π_1 в нижнее положение, двухполюсный Π_2 и трехполюсный Π переключатели — в верхние положения, ползунок делителя напряжения D'' расположить так, чтобы ток возбуждения машины G' был наименьшим, а затем включить рубильники P_2 , P_3 и P_4 .

Изменяя возбуждение машины G' от минимума до такого значения, при котором ток асинхронной машины D будет превышать свое номинальное значение на 25—30%, записывать показания приборов постоянного тока (вольтметра и амперметра), а также отмечать скорость вращения вала машины D .

Результаты испытания занести в таблицу, аналогичную таблице, приведенной в пункте втором.

5. Снять механическую характеристику асинхронной машины D в режиме *динамического торможения*.

Для этого ввести регулировочный реостат r_p в цепи статора полностью и дополнительно к однополюсному переключателю P_1 , поставленному вниз, переключить двухполюсный переключатель Π_2 в аналогичное положение.

Отрегулировать величину постоянного тока согласно схеме питания обмоток статора постоянным током и паспортных данных асинхронной машины D .

Затем, изменяя возбуждение машины G' от наименьшего до наибольшего, записывать показания приборов постоянного тока и измерять скорость вращения вала машины D .

Результаты наблюдений свести в таблицу, аналогичную приведенной в пункте втором.

Обработка результатов испытания

1. Вычислить для всех режимов работы асинхронной машины D момент на валу

$$M = 975 \frac{P_2}{n}, \quad (3)$$

где M — момент на валу исследуемой асинхронной машины, *кГм*;
 P_2 — полезная мощность на валу, *квт*;
 n — скорость вращения вала машины, *об/мин*.

Примечание. Мощность на валу машин D и G , обозначенная через P_2 , может быть найдена из соотношения

$$P_2 = P_1 \pm \Delta P, \quad (4)$$

где P_1 — мощность, отдаваемая (при генераторном режиме) или потребляемая (при двигательном режиме) машиной G ;

ΔP — суммарные потери в машине G при данной нагрузке (знак плюс относится к ее генераторному режиму, а минус — к двигательному).

Мощность

$$P_1 = U_0 I_0, \quad (5)$$

где U_0 — напряжение на зажимах машины G , *в*;
 I_0 — ток якоря, *а*,

а суммарные потери

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4. \quad (6)$$

где ΔP_1 — потери в обмотке якоря;
 ΔP_2 — потери в переходном слое щеток;
 ΔP_3 — потери вращения;
 ΔP_4 — добавочные потери.

Потери в обмотке якоря

$$\Delta P_1 = I_0^2 r_{я}, \quad (7)$$

где I_0 — ток якоря;
 $r_{я}$ — сопротивление обмотки якоря.

Потери в переходном слое щеток

$$\Delta P_2 = \Delta U \cdot I_0, \quad (8)$$

где ΔU — падение напряжения в переходном слое, принимаемое равным 2 в .
 Потери вращения ΔP_3 , состоящие из потерь в стали и механических, зависят от скорости вращения якоря и величины магнитного потока полюсов.

Практически они могут быть найдены из опыта холостого хода, произведенного при различных скоростях вращения.

На рис. 139 в виде примера приведена зависимость потерь вращения ΔP_3 от скорости вращения n при номинальном магнитном потоке полюсов для машины постоянного тока типа ПН-45 с такими номинальными данными: мощностью $P_n = 4,2 \text{ квт}$, $U_n = 110 \text{ в}$, $n_n = 1500 \text{ об/мин}$.

Сопротивление обмотки якоря этой же машины $r_{я} = 1 \text{ ом}$.

Добавочные потери подсчитывают по формуле

$$P_4 = 0,01 U_0 I_0. \quad (9)$$

2. Результаты расчетов оформить в виде таблицы.

№ опытов	n , об/мин	U_0 , в	I_0 , а	ΔP_1 , вт	ΔP_2 , вт	ΔP_3 , вт	ΔP_4 , вт	ΔP , кВт	P_1 , кВт	P_2 , кВт	M , кгм	Наименование режима и типа характеристики
1												
2												
3												
4												
5												

На основании данных таблицы построить в одной координатной системе механические характеристики $n = f(M)$ асинхронной машины трехфазного тока с контактными кольцами для: генераторного торможения с отдачей электроэнергии в сеть, двигательного режима, тормозного режима при однофазной схеме включения и при динамическом торможении постоянным током с нанесением линий номинального момента машины.

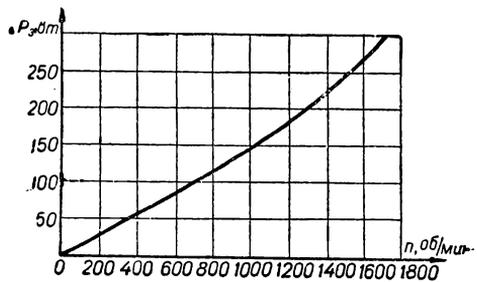


Рис. 139. Зависимость потерь холостого хода P_3 машины постоянного тока типа ПН-45 мощностью $P_H = 4,2$ кВт от скорости вращения.

3. Описать торможение по методу противовключения и указать время, в течение которого происходит полное затормаживание ротора машины.

4. Дать заключение по механическим характеристикам тормозных режимов асинхронной машины трехфазного тока с контактными кольцами, указав преимущества и недостатки отдельных видов электрического торможения.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 212—217, 274, 276—277.
 Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 407—421, 434—436, 453—454, 577—582.

Бельский И. Р., Бесекекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 379—394, 397—398, 317—318, 284—289.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 32—37.

Работа № 39

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ПО СИСТЕМЕ ГЕНЕРАТОР—ДВИГАТЕЛЬ

Цель работы

1. Изучить работу электропривода по системе генератор—двигатель и установить диапазон регулирования скорости вращения.
2. Ознакомиться с регулированием скорости и вращения якоря приводного электродвигателя изменением величины напряжения на жазимах якоря и ослаблением магнитного поля полюсов.
3. Снять опытным путем механические характеристики исследуемой системы электропривода.

Основные теоретические положения

Для современных исполнительных механизмов часто необходим широкий диапазон регулирования скорости вращения при возможности осуществления реверса и тормозных режимов на низких оборотах электродвигателя (быстроходные подъемники, механизмы передвижения мостов больших перегрузочных кранов, мощных башенных кранов, рулевые устройства судов, якорно-швартовые устройства и др.).

Так как эти требования не могут быть удовлетворены одним электродвигателем постоянного тока нормальной конструкции, то для этой цели применяют нормальные машины, объединенные в некоторую систему.

Одной из подобных систем электрического привода является схема, состоящая из специального генератора постоянного тока с независимым возбуждением, который питает всего лишь один приводной электродвигатель, реже несколько электродвигателей и то только в том случае, когда условия их работы совершенно идентичны, например, когда они приводят во вращение отдельные части одного и того же исполнительного механизма с одинаковым законом изменения скорости вращения.

Зажимы якоря такого генератора соединяются с жазимами якоря электродвигателя исполнительного механизма *непосредственно без каких бы то ни было пусковых или пускорегулиро-*

вочных реостатов, что устраняет потери при пуске, величина которых при повторно-кратковременном режиме работы грузоподъемных устройств играет значительную роль.

Так как во время работы напряжение генератора может изменяться в довольно широких пределах, то обмотки возбуждения электродвигателя питаются от отдельного возбудителя или от независимой сети постоянного тока через соответствующий регулировочный реостат.

В качестве приводного двигателя генератора обычно применяется асинхронный электродвигатель трехфазного тока с короткозамкнутым ротором, а при наличии только сети постоянного тока (судовые устройства) — электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения.

В очень мощных агрегатах генератор и электродвигатель постоянного тока исполнительного механизма имеют отдельные возбудители, обмотки возбуждения которых питаются от своего специального возбудителя.

При пиковых нагрузках асинхронный электродвигатель, вращающий генератор, снабжается маховиком, сглаживающим неровности в нагрузке.

В электроприводах, выполненных по таким схемам путем плавного повышения величины напряжения генератора, регулируемого током возбуждения, возможно осуществлять безреостатный пуск электродвигателя постоянного тока.

При малом возбуждении напряжение на зажимах генератора, а следовательно, и электродвигателя будет небольшое и, несмотря на отсутствие в покоящейся обмотке якоря электродвигателя противоэлектродвижущей силы, последний начнет разворачиваться при небольшом токе.

По мере возрастания скорости вращения якоря и росте противоэлектродвижущей силы, напряжение генератора можно постепенно повышать до тех пор, пока не установится необходимая скорость вращения.

Таким образом, пуск электродвигателя при данной системе привода производится регулированием небольшого тока возбуждения генератора, а следовательно, протекает при ничтожно малых потерях энергии.

Скорость вращения электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения определяется по формуле

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} r_{\text{я}}}{c \Phi_{\text{д}}}, \quad (1)$$

где U — напряжение на зажимах якоря электродвигателя;

$I_{\text{я}}$ — ток якоря;

$r_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря электродвигателя;

$\Phi_{\text{д}}$ — магнитный поток электродвигателя.

Как видно из формулы (1), регулирование скорости вращения якоря электродвигателя постоянного тока можно осуществлять изменением напряжения U или изменением величины магнитного потока Φ_d .

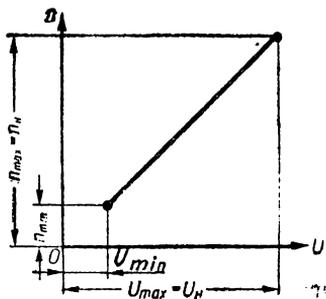


Рис. 140. Зависимость скорости вращения якоря электродвигателя постоянного тока от величины напряжения на его зажимах.

При небольших скоростях вращения магнитный поток электродвигателя оставляют неизменным, *равным наибольшему*, и регулирования числа оборотов в минуту осуществляют изменением величины напряжения U , подводимого к зажимам якоря. Последнее регулируют изменением тока возбуждения генератора.

В этом случае изменение скорости вращения якоря n в зависимости от величины подведенного напряже-

ния U при постоянном моменте нагрузки

$$M = \kappa \Phi_d I_a \quad (2)$$

согласно соотношению (1), если пренебречь реакцией якоря, изобразится прямой линией (рис. 140), т. е. скорость вращения якоря электродвигателя исполнительного механизма будет прямо пропорциональна величине напряжения, подведенного к якорю.

Наименьшая скорость вращения n_{\min} определяется величиной минимального напряжения U_{\min} , при котором еще возможна устойчивая работа электродвигателя, а наибольшая — n_{\max} , устанавливаемая при полном возбуждении обеих машин, обеспечивается максимальным, а вместе с тем и номинальным напряжением генератора $U_{\max} = U_n$.

Полученная таким образом скорость вращения якоря $n_n = n_{\max}$ называется *номинальной, или основной, скоростью вращения*.

Практически диапазон регулирования скорости определяется отношением $\frac{n_{\max}}{n_{\min}}$, которое в данной системе равно 6—10, а иногда и выше.

Так как при регулировании скорости вращения изменением величины напряжения допустимый момент по напряву $M = \kappa \Phi_d I_a = \text{const}$, то допустимая мощность

$$P = \frac{Mn}{975} \quad (3)$$

будет возрастать пропорционально скорости вращения якоря электродвигателя.

Таким образом, *регулирование скорости вращения электродвигателя изменением напряжения на зажимах якоря при постоянном возбуждении протекает при постоянном моменте и переменной мощности* (рис. 141).

Дальнейшее повышение скорости вращения якоря электродвигателя получают ослаблением его магнитного потока Φ_d , т. е. уменьшением тока возбуждения электродвигателя $I_{вд}$.

Зависимость скорости вращения якоря электродвигателя от тока возбуждения изображается кривой, представленной на рис. 142.

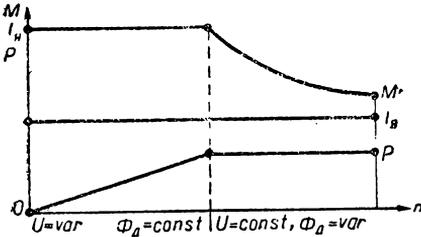


Рис. 141. Изменение длительно допустимых момента, мощности и тока при регулировании скорости вращения якоря электродвигателя в электропроводе по системе генератор—двигатель.

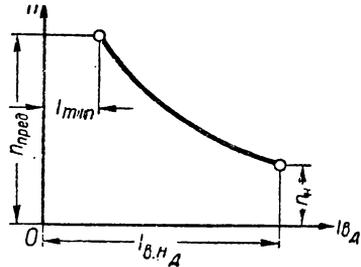


Рис. 142. Изменение скорости вращения якоря электродвигателя постоянного тока в зависимости от тока возбуждения.

Предельно допустимая скорость вращения $n_{пред}$ определяется на основе механических и электрических соображений и в современных регулируемых электродвигателях постоянного тока параллельного возбуждения доходит до значения $n_{пред} = 2n_n$, хотя в специальных конструкциях машин она может достигать значений $n_{пред} = 5n_n$.

Таким образом, полагая $n_{пред} = 2n_n$, получим общий предел регулирования скорости электропривода по системе Г—Д порядка $(6-10) \cdot 2 = 12-20$.

При регулировании скорости вращения n ослаблением магнитного потока электродвигателя Φ_d приходится, исходя из условий допустимого нагрева, уменьшать момент по закону гиперболы, оставляя мощность неизменной (рис. 141).

Кроме безреостатного пуска и широкого регулирования скорости вращения, система Г—Д позволяет достаточно просто изменять направление вращения якоря электродвигателя. Это достигается изменением направления тока в обмотке возбуждения генератора, что при постоянном направлении вращения якоря последнего приводит к перемене полярности на щетках электродвигателя постоянного тока, вызывающей противоположное направление вращения его якоря.

Электрическое торможение электродвигателя в системе Г—Д получается при изменении направления тока в его якоре, из-за чего меняется направление момента, который становится тормозным и действует против вращения. Практически это достигается уменьшением магнитного потока генератора Φ_r или увеличением магнитного потока электродвигателя Φ_d , если последний работал до этого с ослабленным магнитным полем.

Часть энергии торможения расходуется на покрытие потерь в электродвигателе и генераторе, а остальная — передается на вал преобразовательного агрегата, в результате чего возможен переход асинхронного электродвигателя в генераторный режим с отдачей электроэнергии в трехфазную сеть.

Торможение при системе Г—Д может быть даже при очень низких скоростях вращения, чего не наблюдается в других системах электропривода и позволяет получать плавную и весьма точную остановку исполнительного механизма почти без всяких потерь энергии.

Следует иметь в виду, что при торможении необходимо постепенно изменять величину сопротивлений в цепях возбуждения электродвигателя и генератора, так как при резких их изменениях возникают очень большие толчки тока и момента.

Если электродвигатель работает на переменную нагрузку при постоянных магнитных потоках возбуждения генератора и электродвигателя, то зависимость скорости вращения якоря от момента на валу — или что эквивалентно — от тока якоря, так как

$$M = k\Phi_d I_{я}, \quad (4)$$

может быть представлена универсальной диаграммой, приведенной на рис. 143.

Характеристики $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ и $\Phi_d = \text{const}$, расположенные в первом и третьем квадрантах универсальной диаграммы, отвечают двигательному режиму машины для обоих направлений вращения, а находящиеся во втором и четвертом квадрантах — тормозному режиму работы электродвигателя для соответствующих направлений вращения якоря.

Над естественной характеристикой, проходящей в первых двух квадрантах, располагается семейство искусственных характеристик, получающихся при $U = U_n = \text{const}$ и ослабленном магнитном потоке электродвигателя Φ_d , а под ней — характеристики при уменьшенном напряжении и наибольшем магнитном потоке электродвигателя Φ_d .

Характеристики электродвигателя при $\Phi_d = \text{const}$ и пренебрежении реакцией якоря являются параллельными прямыми, что следует из соотношения (1), так как величина падения напряжения в цепи якоря остается одной и той же для всех характеристик.

Что касается характеристик, отвечающих ослабленному магнитному потоку, то жесткость их несколько уменьшается, но практически это мало заметно и они выглядят почти параллельными прямыми. Переход от одной характеристики к другой осуществляется изменением токов возбуждения генератора или электродвигателя.

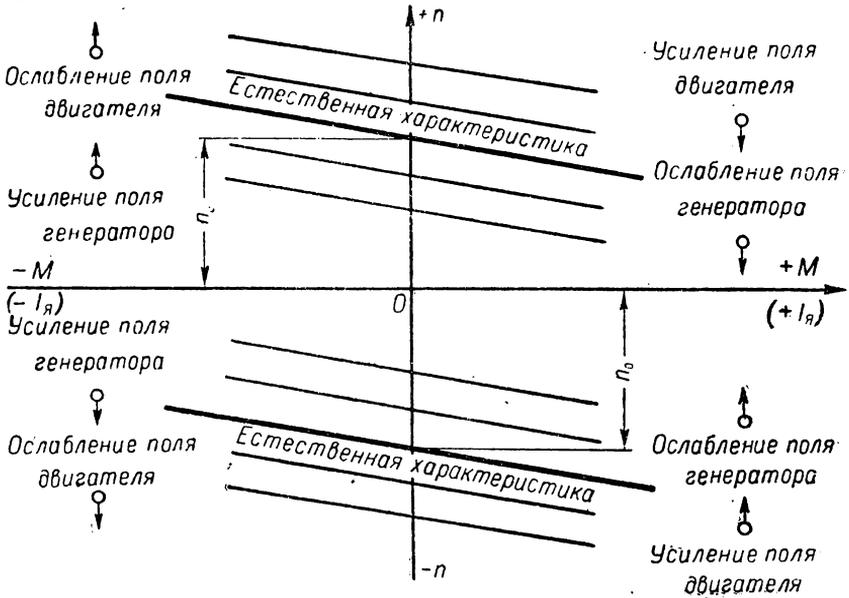


Рис. 143. Механические характеристики электропривода по системе Г—Д.

Недостатком электропривода, работающего по системе генератор—двигатель, является значительное число электрических машин и наличие потерь при преобразовании энергии трехфазного тока в постоянный.

Однако последнее обстоятельство при частых пусках привода в ход компенсируется практическим отсутствием потерь в пусковых и тормозных сопротивлениях, характерных для однодвигательного электропривода.

Описание схемы установки

Генератор постоянного тока Г (рис. 144) приводится во вращение асинхронным электродвигателем трехфазного тока с короткозамкнутым ротором Д', с которым он соединен при помощи муфты.

Цепь возбуждения генератора Г питается через делитель напряжения Д₁, что дает возможность регулировать величину на-

пряжения на зажимах якорей генератора Γ и электродвигателя постоянного тока \mathcal{D} , приводящего во вращение исполнительный механизм.

Исполнительным механизмом является машина постоянного тока Γ_T , сидящая на одном валу с электродвигателем \mathcal{D} .

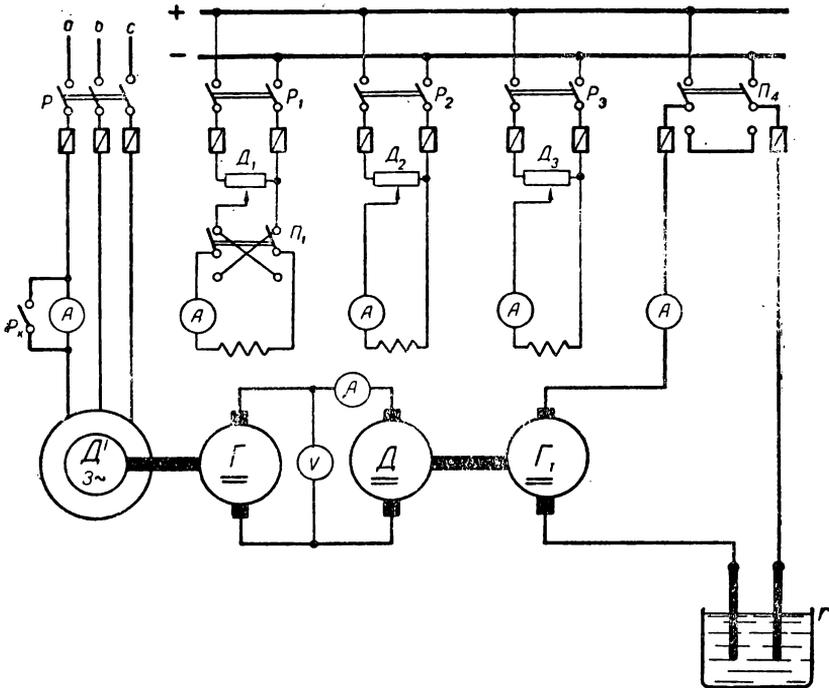


Рис. 144. Схема исследования электропривода по системе генератор—двигатель.

Двухполюсный переключатель P_1 служит для изменения направления тока в обмотке возбуждения генератора Γ , а следовательно, для реверсирования электродвигателя исполнительного механизма \mathcal{D} .

Обмотки возбуждения электродвигателя \mathcal{D} и машины Γ_T питаются от сети постоянного тока через делители напряжения \mathcal{D}_2 и \mathcal{D}_3 соответственно.

При снятии рабочих характеристик машина Γ_T работает как генератор, а жидкостный реостат r , находящийся в цепи ее якоря, является нагрузкой. Последняя включается установкой ручки двухполюсного переключателя P_4 в нижнее положение.

Для получения тормозных характеристик машину Γ_T пускают в режиме электродвигателя от сети постоянного тока (ручка двухполюсного переключателя P_4 должна быть в верхнем положении).

нии) и жидкостный реостат r служит пускорегулирующим приспособлением.

Питание электродвигателя D' производится от сети трехфазного тока a, b, c , а всех прочих цепей — от сети постоянного тока.

Проведение опыта

1. Проверить правильность соединений на смонтированной установке и устранить все замеченные дефекты выполненного монтажа.

2. Проверить работоспособность отдельных частей установки, для этого осуществить поочередное питание всех цепей возбуждения, вращение электродвигателя исполнительного механизма D машиной G_T и, выключив все цепи возбуждения машин постоянного тока, пропустить асинхронный электродвигатель D' , *предварительно замкнув однополюсный рубильник R_K .*

3. Если все части установки действуют безотказно, выключить трехполюсный рубильник P и приступить к установлению диапазона регулирования скорости вращения электродвигателя исполнительного механизма.

Для этого включить двухполюсные рубильники P_1 и P_2 и ползунками делителей напряжений D_1 и D_2 установить наименьший ток возбуждения у генератора и наибольший у электродвигателя. После этого включить трехфазный асинхронный электродвигатель D' .

По мере его разворачивания в обмотке якоря генератора G начнет наводиться электродвижущая сила, под действием которой в цепи машин G и D появится ток и якорь электродвигателя исполнительного механизма начнет разворачиваться.

Когда период разгона закончится и наступит *установившееся* вращение, необходимо тахометром измерить скорость вращения вала электродвигателя n_{\min} .

Затем *постепенно* увеличивать возбуждение генератора и довести напряжение до наибольшего значения U_{\max} и снова измерить скорость вращения вала электродвигателя n_{\max} , *не забыв при этом переключить пределы измерения тахометра.*

Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Скорость вращения вала электродвигателя D , об/мин	
	наименьшая n_{\min}	наибольшая n_{\max}
1		—
2	—	

4. Для установления зависимости изменения скорости вращения якоря электродвигателя n от величины подводимого напряжения U при постоянном моменте M провести данный опыт при холостом ходе агрегата.

Установить токи возбуждения у генератора G и электродвигателя D , близкие к наибольшим, и измерить скорость вращения вала исполнительного механизма.

В дальнейшем на протяжении всего опыта поддерживать неизменным ток возбуждения электродвигателя и уменьшать ток возбуждения генератора до тех пор, пока работа электродвигателя будет вполне устойчивой. При этом необходимо измерять скорость вращения вала электродвигателя D и отмечать величину напряжения на его зажимах.

Результаты опытов свести в таблицу.

№ опытов	Ток возбуждения, a		Напряжение на зажимах якорей генератора и электродвигателя $U, в$	Скорость вращения вала электродвигателя $n, об/мин$
	генератора $I_{вГ}$	электродвигателя $I_{вД}$		
1				
2				
3				
4				
5				
6				

5. Для выяснения закона изменения скорости вращения якоря электродвигателя n при ослаблении его магнитного потока и неизменном напряжении на зажимах якоря U_n следует дать генератору возбуждение, близкое к наибольшему, постепенно вводить реостат в цепь возбуждения электродвигателя, измеряя при этом скорость вращения его якоря.

Не допускать повышения скорости вращения якоря свыше 25—30% по отношению к номинальной.

Данные наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Ток возбуждения, a		Напряжение на зажимах якорей генератора и электродвигателя $U_n, в$	Скорость вращения вала электродвигателя $n, об/мин$
	генератора $I_{вГ}$	электродвигателя $I_{вД}$		
1				
2				
3				
4				
5				
6				

6. Снять естественную характеристику электропривода по системе генератор—двигатель в нагрузочном режиме.

Для этого дать наибольшее возбуждение генератору G и электродвигателю D , включить двухполюсный рубильник P_3 цепи возбуждения тормозного генератора и поставить ручку двухполюсного переключателя P_4 в нижнее положение.

Постепенным погружением ножей жидкостного реостата уменьшать сопротивление в цепи якоря, что приведет к увеличению нагрузки на электродвигатель D , и отмечать при этом ток якорей генератора и электродвигателя $I_{я}$, а также скорость вращения вала электродвигателя n .

То же проделать для получения искусственных характеристик, причем одну из них снять при неизменном снижении значения напряжения и постоянном, наибольшем возбуждении электродвигателя, а другую при $U_n = \text{const}$, но ослабленном, неизменном возбуждении электродвигателя.

Результаты опытов представить в виде таблицы.

№ опыта	Напряжение на зажимах якорей генератора и электродвигателя $U, в$	Ток якорей генератора и электродвигателя $I_{я}, а$	Ток возбуждения электродвигателя $I_{вд}, а$	Скорость вращения вала электродвигателя $n, об/мин$	Примечания
1					Естественная характеристика $U = U_n; \Phi_d = \Phi_{дн}$
2					
3					
4					
5					
1					Искусственная характеристика $U < U_n; \Phi_d = \Phi_{дн}$
2					
3					
4					
5					
1					Искусственная характеристика $U = U_n; \Phi_d < \Phi_{дн}$
2					
3					
4					
5					

7. Снять естественную и две искусственные характеристики тормозного режима электропривода по системе генератор—двигатель.

Для снятия этих характеристик машина Γ_T должна быть поставлена в режим электродвигателя, для этого двухполюсный переключатель Π_4 необходимо переключить в верхнее положение.

Величина тормозного момента создается путем изменения сопротивления в цепи якоря r и тока возбуждения машины Γ_T .

Механические характеристики при тормозном режиме следует снять для тех же значений напряжения на зажимах якорей и тока возбуждения электродвигателя, что и рабочие кривые (всех механических характеристик, включая и естественную, должно быть три).

Данные, полученные при проведении испытания в тормозном режиме, следует свести в таблицу, аналогичную таблице пятого пункта.

8. Пустить агрегат в режиме холостого тока, а затем изменить двухполюсным переключателем Π_1 направление тока в обмотке возбуждения генератора Γ и записать, какие изменения произойдут при этом в исследуемой системе электропривода.

9. Составить перечень всего оборудования, использованного при испытании электропривода по системе генератор—двигатель и привести его технические данные.

Обработка результатов испытания

1. Установить фактический общий диапазон регулирования скорости вращения электропривода по системе генератор—двигатель.

2. Вычертить зависимость скорости вращения якоря электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения от величины напряжения, подведенного к зажимам якоря, т. е. $n = f(U)$ при $I_{вд} = \text{const}$.

3. Составить график зависимости скорости вращения якоря электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения от тока возбуждения, т. е. $n = f(I_{вд})$ при $U = \text{const}$.

4. Составить универсальную диаграмму электропривода по системе генератор—двигатель, интерпретировав ее тремя графиками $n = f(I_{я})$ соответственно для рабочего и тормозного режимов электродвигателя исполнительного механизма.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 272—274.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 561—572.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 306—311, 317—318.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 22—27, 40—41.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Цель работы

1. Ознакомиться с методами измерения температуры различных частей машин постоянного и переменного токов.
2. Построить экспериментальные кривые нагрева с определением постоянных времени нагрева и наибольших температур перегрева отдельных деталей над окружающей средой.
3. Пересчитать номинальную мощность длительного режима работы электрических машин на мощность при кратковременном и повторно-кратковременном режиме работы.

Основные теоретические положения

При работе электрических машин как в двигательном, так и в генераторном режимах из-за наличия механических, магнитных, электрических и добавочных потерь в них выделяется тепло.

Часть этого тепла идет на повышение температуры машины, а часть путем теплопроводности, конвекции и лучеиспускания отводится в окружающую среду.

При выборе мощности генератора для электроснабжения или электродвигателя для привода исполнительного механизма необходимо исходить из того, чтобы выбранная машина по истечении определенного времени работы оказалась нагретой в соответствии с нормами, т. е. не выше их, что недопустимо, и по возможности не ниже, что неэкономично в смысле эксплуатации.

При выборе мощности электрических машин, несущих переменную нагрузку, приходится принимать во внимание непрерывно изменяющийся температурный режим, на протяжении которого температуры отдельных деталей не должны даже мгновенно превышать величин, установленных нормами.

Такое строгое ограничение предельно допускаемой температуры в электрических машинах вызвано тем, что слишком высокие температуры вызывают преждевременное высыхание, обугливание, крошение и потерю изолирующих свойств диэлектриков, применяемых в электрических машинах. Последнее приводит к значительному сокращению срока службы машин.

Конечные температуры отдельных деталей электрических машин сразу установить нельзя.

После пуска в ход с холодного состояния, т. е. с такого, когда температура машины равна температуре окружающей среды, температура отдельных частей машин начинает постепенно возрастать.

При продолжительном режиме работы это повышение температуры продолжается до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие, на что требуется от 2 до 12 час. в зависимости от мощности и конструктивного оформления машины.

При кратковременном или повторно-кратковременном режимах работы рост температуры прекращается при каждом выключении машины.

В процессе нагрева отдельные части машины (обмотки якоря, возбуждения статора, ротора, коллектор, контактные кольца, подшипники и т. д.), несущие продолжительную постоянную нагрузку, получают определенный перегрев над окружающей средой.

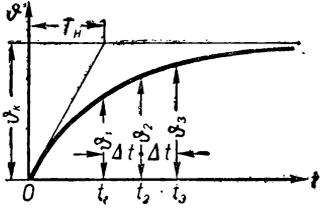


Рис. 145. Кривая нагрева электрической машины, несущей длительную неизменную нагрузку.

Аналитическое определение величины перегрева над окружающей средой как функции времени представляет большие трудности и практически почти невозможно.

Это объясняется чрезвычайной сложностью тепловых процессов, происходящих в электрических машинах.

Неоднородность самих машин, изменение при различных режимах их работы направления тепловых потоков (при холостом ходе — от стали к меди, а при полной нагрузке — от меди к стали) и целый ряд иных факторов усложняют проведение исследований.

Поэтому для упрощения исследования считают отдельные части электрических машин однородными и динамику теплового процесса, начатого с холодного состояния, выражают известным уравнением нагрева с холодного состояния

$$\theta = \theta_k \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right), \quad (1)$$

где θ_k — конечная температура перегрева отдельной детали электрической машины над окружающей средой;

T_n — постоянная времени нагрева; величина, не зависящая от нагрузки машины, работающей с неизменной скоростью и измеряющаяся в единицах времени.

Из приведенного уравнения (1) и рис. 145 видно, что теоретически превышение температуры θ над окружающей средой достигает установившегося значения θ_k через бесконечно большой промежуток времени.

Практически же температуру можно считать установившейся по истечении времени

$$t_0 = (3-5) T_n. \quad (2)$$

Таким образом, в процессе нагрева электрических машин большое значение имеет постоянная времени нагрева T_n . Ее мож-

но определить, если воспользоваться кривой нагрева, измеряя отрезок асимптоты, между осью ординат и касательной к экспоненциальной кривой нагрева, проведенной через начало координат (рис. 145).

Лучшие результаты дает аналитический способ, основанный на использовании трех температур $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$, взятых из кривой нагрева через равные промежутки времени $\Delta t = t_2 - t_1 = t_3 - t_2$, согласно которого постоянная времени нагрева T_n , может быть определена из следующего соотношения:

$$T_n = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\vartheta_3 - \vartheta_2}} \quad (3)$$

Если постоянная времени электрической машины неизвестна, то ориентировочно, не производя испытания на нагрев, можно считать, что тепловое равновесие устанавливается в электрических машинах малой мощности и в машинах с искусственной вентиляцией приблизительно через 2—3 час., в открытых машинах средних и больших мощностей через 4—8 час., а в машинах закрытого исполнения через 12 и более часов.

По нормам ГОСТ нагрев электрических машин считается законченным, если приращение перегрева не превышает 1° в течение 1 час.

Так как на практике, в особенности при исследованиях крупных машин, требующих длительного теплового испытания, опыт нагрева по причинам технического порядка часто не может быть проведен до конца, то, пользуясь только частью снятой кривой нагрева все же при помощи графического метода, можно найти конечную температуру перегрева ϑ_k .

Для этого из снятой части кривой нагрева находят приращения температуры $\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \dots, \Delta\vartheta_n$ (рис. 146) за равные промежутки времени Δt (порядка 10—15 мин.), начиная с того момента, когда температура перегрева машины достигла приблизительно $\frac{\vartheta_k}{2}$.

Затем откладывают полученными таким образом значения $\Delta\vartheta_i$, увеличенные в произвольное число m раз, и, проводя пунктирную прямую через концы отложенных отрезков, получают на оси ординат значение конечной температуры перегрева данной детали электрической машины ϑ_k по отношению к окружающей среде.

Увеличение откладываемых отрезков $\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \dots$ в m раз производится для того, чтобы проводимая пунктирная прямая, пере-

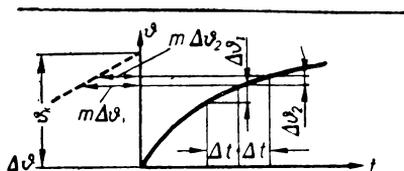


Рис. 146. Графическое определение конечной температуры перегрева отдельной детали электрической машины.

секала ось ординат не под очень острым углом, что необходимо для получения более достоверного результата при определении величины Φ_k .

Для нормальной безаварийной эксплуатации электрических машин температура отдельных ее частей в самом горячем месте не должна превышать некоторого максимума, ограниченного условиями механической или электрической работы данной детали.

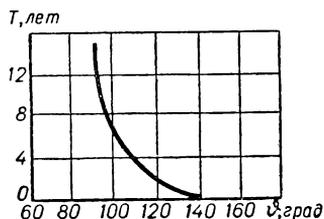


Рис. 147. Кривая зависимости срока службы хлопчатобумажной изоляции от температуры ее нагрева.

Слишком высокая температура коллектора или контактных колец может вызвать деформацию их формы, а чрезмерная температура других частей машины приведет к карбонизации хлопчатобумажной изоляции и вызовет появление хрупкости миканита.

Это так называемое старение изоляции, приводящее к преждевременному выводу машины из строя, зависит не только от значения наибольшей температуры, но также и от времени ее действия.

Значение предельно допускаемых превышений температур отдельных частей электрических машин над окружающей средой зависит от ее температуры, условно принимаемой 35°, и от применяемого класса изоляции.

При более низкой температуре охлаждающей воздушной среды нормы не содержат каких-либо определенных указаний повышения мощности машин, так как теоретическое разрешение этого вопроса для различных конструкций связано с трудностями.

Из пяти классов изоляционных материалов, предусмотренных нормами ГОСТ 183—41, —А, В, ВС, СВ, С, в электрических машинах наибольшим распространением пользуются первые два, причем для изоляции класса А (хлопчатобумажные волокна, пряжа и ткань, шелк, бумага, картон, фибра, дерево и подобные органические материалы, пропитанные электроизоляционными лаками, пропиточными составами, или органическими эмалями) предельная длительная температура устанавливается 105°, а для изоляции класса В (изделия из слюды, асбеста, стекло-волокон, пропитанных органическими жидкими электроизоляционными составами обычной теплостойкости) — 125°.

Для эмалевой изоляции, нашедшей применение в настоящее время и получившей название «винифлекс», допускается предельная длительная температура 150°.

Принятые температуры получены в результате длительных исследований и обеспечивают достаточно долгий срок службы изоляции.

На рис. 147 приведена экспериментально полученная зависимость, показывающая изменение срока службы хлопчатобумажной изоляции в зависимости от температуры ее нагрева Φ .

Как видно из этой кривой, при температуре 100° изоляция практически не повреждается, работая около 8 лет при непрерывном длительном нагреве.

При большей же температуре изоляция начинает обугливаться и срок службы ее резко снижается. Если температура хлопчатобумажной изоляции 115°, срок службы ее сокращается до 2 лет, а при температуре 125° — до нескольких месяцев.

Измерение температуры отдельных частей электрических машин производится ртутными, спиртовыми или какими-либо другими жидкостными термометрами, температурными детекторами, термопарами и по способу сопротивления.

Спиртовые термометры рекомендуется применять при наличии переменных магнитных полей, когда ртутные недопустимы из-за появления в ртути вихревых токов, которые могут вызвать увеличение показаний термометра.

При измерении температуры различных деталей машин термометр плотно прикладывается к наиболее нагретому месту исследуемой части, причем для лучшей теплопередачи шарик термометра оборачивают металлической фольгой и прикрывают сверху слоем ваты или войлока.

Однако указанный метод не дает возможности измерить температуру в наиболее нагретых частях машин, так как для установки жидкостного термометра они большей частью недоступны.

Измерение температуры в таких малодоступных местах машин производится температурными детекторами или термопарами.

Принцип действия первых основан на изменении сопротивления металлического проводника при нагревании, что дает возможность судить о температуре нагрева того места машины, куда помещен температурный детектор, а вторых — на способности генерировать термоэлектродвижущую силу (порядка 40—60 мкв на 1°) в нагреваемом спаяе, изготовленном из двух разнородных металлов (например: медь-константан; хромоникель-константан; хромель-алюмель; хромель-копель и др.), который располагается в исследуемом месте машины.

Измерение среднего превышения температуры обмотки, выполненной из чистой меди, над окружающей средой, может быть проведено по способу сопротивления, используя формулу

$$\vartheta_k = \frac{r_2 - r_1}{r_1} (234,5 + \vartheta_1), \quad (4)$$

где r_1 и r_2 — сопротивления обмотки машины соответственно в холодном и нагретом состоянии;

ϑ_1 — начальная температура обмотки, равная температуре окружающей среды.

Определение величин сопротивлений r_1 и r_2 производится по одному из методов измерения сопротивлений.

В некоторых случаях может быть использован метод вольтметра и амперметра, причем в каждом частном случае следует выбирать соответствующую схему для измерения «больших» (параллельные обмотки возбуждения машин постоянного тока) или «малых» сопротивлений (последовательные обмотки возбуждения машин постоянного тока, компенсационные обмотки, обмотки якостей и добавочные полюсов машин постоянного тока, обмотки статоров и роторов машин переменного тока и т. д.).

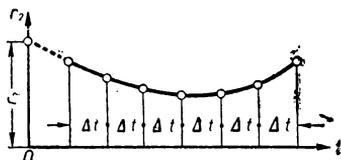


Рис. 148. Определение сопротивления обмоток в момент остановки машины.

Производя измерение сопротивлений обмоток в холодном состоянии r_1 , следует пользоваться небольшими токами порядка 10—20% номинального тока данной обмотки, во избежание подогрева ее и получения неправильных результатов измерения.

Начальная температура обмоток ϑ_1 , равная температуре окружающей среды $\vartheta'_в$, определяется термометрами, расположенными на уровне средней высоты машины, где они подвешиваются на расстоянии 1—2 м от испытуемой машины, чтобы не подвергать их влиянию тепловых конвекционных потоков и чрезмерному воздействию лучистой теплоты.

Что касается определения сопротивления обмоток в нагретом состоянии r_2 , то для обмоток возбуждения, питаемых постоянным током, в которых при работе машин, не наводятся дополнительные электродвижущие силы измерение может быть проведено во время хода на основании показаний вольтметра и амперметра.

В прочих обмотках, в которых во время работы машины наводятся электродвижущие силы (обмотки якостей машин постоянного тока) или которые обтекаются переменным током (обмотки статоров и роторов машин переменного тока), для производства измерений приходится прерывать нормальное питание машины, останавливать ее и только тогда измерять величину сопротивления на постоянном токе.

Так как с момента прерывания нормального питания до полной остановки и производства измерений величины r_2 проходит некоторое время, в течение которого машина охлаждается, то измеренная величина не вполне соответствует той температуре, которая имела место в работающей машине.

Для нахождения истинного значения r_2 в момент выключения машины проводят несколько измерений через равные промежутки времени Δt и строят кривую $r_2 = f(t)$, характеризующую процесс охлаждения данной обмотки (рис. 148).

Путем экстраполяции на момент остановки (пунктирная линия) можно найти величину сопротивления r_2 в момент выключения электрической машины.

Иногда после выключения машины температура не умень-

шается, а начинает возрастать и только спустя некоторое время снижается.

Это объясняется изменением направления теплового потока в машине из-за прекращения вентиляции.

В этом случае в расчет вводят наибольшее значение r_2 , которое получается из графика $r_2 = f(t)$.

Так как каждый метод измерения температуры отдельных частей электрических машин может дать ошибку в преуменьшении действительно имеющей место температуры, то в нормах, устанавливающих предельные перегревы отдельных деталей электрических машин над окружающей средой, указывается также способ измерения температуры.

Согласно нормам ГОСТ 183—41, 404—41, 533—41 наибольшие допускаемые превышения температур для электрических машин и трансформаторов при температуре охлаждающего воздуха $+35^\circ$ устанавливаются следующие (табл. 4).

Таблица 4

Наименование частей электрических машин	Допускаемые превышения температур (град.) обмоток с изоляцией класса			
	Класс А		Класс В	
	Метод термометра	Метод сопротивления	Метод термометра	Метод сопротивления
Обмотки машин переменного тока мощностью до 5000 <i>кв</i>	60	65	75	85
Обмотки якорей машин постоянного тока	60	65	75	85
Многослойные обмотки возбуждения, питаемые постоянным током	60	65	75	85
Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев и компенсационные обмотки машин постоянного тока	65	65	85	85
Стальные части машин, соприкасающиеся с обмотками	65	—	85	—
Защищенные и незащищенные контактные кольца	70	—	90	—
Коллекторы	65	—	85	—
Подшипники скольжения	45	—	45	—
Подшипники качения	60	—	60	—
Обмотки силовых трансформаторов	—	70	—	—
Сердечники силовых трансформаторов (на поверхности)	75	—	—	—
Масло силовых трансформаторов (в верхних слоях)	60	—	—	—

Описание схемы установки

Установка, предназначенная для проведения теплового испытания электрических машин (рис. 149), состоит из спаренных асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором и генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

В первой машине во время ее работы определяется перегрев стали статора ϕ_0 и обмоток, заложенных в его пазы, ϕ_m по отношению к окружающей воздушной среде при помощи термпар 1 и 2, поочередно обслуживаемых одним милливольтметром mV , проградуированным на градусы.

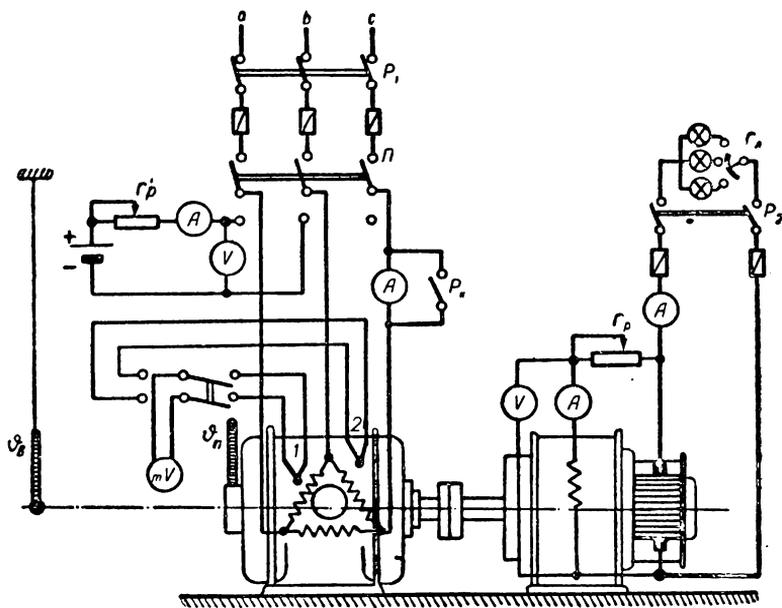


Рис. 149. Схема установки для исследования нагрева различных деталей электрических машин переменного и постоянного тока.

Помимо этого, при помощи измерительной схемы постоянного тока, присоединяемой к *неподвижной машине*, возможно путем подсчетов (способ сопротивлений) установить превышение температуры обмоток статора над окружающей средой.

Термометр ϕ_n дает возможность во время хода машины наблюдать за повышением температуры подшипника с течением времени.

Во второй машине вольтметр и амперметр, приключенные к цепи возбуждения, дают возможность во время вращения косвен-

ным путем измерять ее сопротивление, а следовательно, судить о ее перегреве ϑ_v над окружающей средой.

Температура окружающей среды ϑ_v определяется по специальному термометру, подвешенному на уровне вала машины на расстоянии 1—2 м от него. Здесь же располагаются концы проводов, идущих от термопар к милливольтметру.

Нагрузка генератора создается при помощи лампового реостата r_d , о величине ее судят по показаниям амперметра A , включенного во внешнюю цепь.

Нагрузка электродвигателя определяется по амперметру A , включенному в цепь статора.

Однополюсный рубильник P_k служит для замыкания амперметра A накоротко, на период пуска, во избежание перегрузки его пусковым током электродвигателя.

Трехполюсным переключателем Π подключают обмотки статора асинхронного электродвигателя к сети трехфазного тока или присоединяют к ним схему постоянного тока для измерения их сопротивления по методу вольтметра и амперметра.

Проведение опыта

1. Проверить правильность соединений на смонтированной установке, устранить все замеченные дефекты и возможные ошибки выполненного монтажа.

2. Измерить сопротивление обмоток статора в холодном состоянии. Для этого включить трехполюсным переключателем Π схему постоянного тока и записать показания приборов при токе не более 10—20% от номинального тока машины.

Наблюдения провести при различных значениях токов и напряжений, а при вычислении величины сопротивления обмоток статора в холодном состоянии взять среднее из найденных значений.

Данные, полученные при измерениях, свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Ток $I, а$	Температура воздуха $\vartheta_v, град$
1			
2			
3			

3. Отключить схему постоянного тока, поставить трехполюсный переключатель Π в другое положение, замкнуть однополюсный рубильник P_k и включить трехполюсный рубильник P_1 .

Как только агрегат достигнет установившейся скорости вращения и произойдет самовозбуждение генератора постоянного тока, **быстро и точно** произвести отсчеты по приборам, присоединенным к обмотке возбуждения при двух-трех положениях регулировочного реостата r_p .

В дальнейшем по этим данным определить величину сопротивления обмотки возбуждения генератора в холодном состоянии. Результаты, полученные при опыте, свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение на концах параллельной обмотки возбуждения $U_B, в$	Ток возбуждения $I_B, а$
1		
2		
3		

4. **Быстро** отрегулировать регулировочным реостатом r_p напряжение генератора до значения, близкого к номинальному, включить двухполюсным рубильником P_2 нагрузку R_L и разомкнуть однополюсный рубильник P_K .

Установить величину нагрузки, а затем *поддерживать ее на протяжении всего опыта так, чтобы при неизменном токе возбуждения генератора постоянного тока асинхронный электродвигатель потреблял из трехфазной сети свой номинальный ток либо кратную ему величину, для которой исследуется тепловой режим машины.*

5. В дальнейшем через каждые 5—10 мин. производить *одновременный отсчет по всем приборам до установления теплового равновесия хотя бы двух деталей электрических машин.*

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Время t , мин.	Температура воздуха ϑ'_B , град.	Асинхронный электродвигатель				Генератор постоянного тока	
			Ток статора $I, а$	Температура перегрева над окружающей средой, град.		Температура подшипника, град. ϑ_n	Напряжение на концах обмотки возбуждения $U_B, в$	Ток возбуждения $I_B, а$
				Обмоток статора ϑ_M	Стали статора ϑ_C			
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

6. Данный заключительный пункт опыта, преследующий измерение сопротивления обмотки статора в горячем состоянии, производится тогда, когда тепловое испытание считается законченным, и требует от экспериментаторов *большой тщательности, быстроты, исключительной четкости и организованности в работе.*

Один из экспериментаторов должен отключить трехфазный ток переключателем *П* и *одновременно* с этим пустить секундомер.

Когда агрегат *совершенно остановится*, надо сейчас же присоединить переключателем *П* к обмоткам статора схему постоянного тока и отрегулировать регулировочным реостатом r'_p такой режим, при котором стрелки приборов находились бы в средней части шкал.

Затем, через равные промежутки времени (порядка 20 — 30 сек.) необходимо делать отсчеты по приборам *с максимальной возможной точностью.*

Таких отсчетов надо проделать 8—10, после чего выключить постоянный ток и разомкнуть рубильник P_1 .

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Время t , сек.	Напряжение U , в	Ток I , а
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Примечание. В первой графе таблицы (1-я строка) указывается время, прошедшее от момента выключения трехфазного тока до первого отсчета по измерительным приборам постоянного тока.

7. Составить перечень всего оборудования, использованного при проведении теплового испытания электрических машин и привести паспортные данные последних.

Обработка результатов испытания

1. Построить в *одной* координатной системе кривые нагрева обмоток статора электродвигателя, стали статора и подшипника, т. е. кривые: $\vartheta_m = f(t)$, $\vartheta_c = f(t)$, $\vartheta_n = f(t)$ при $\vartheta'_B = \text{const}$.

2. Пользуясь данными наблюдений и формулой (4), определить величину перегрева ϑ_B параллельной обмотки возбуждения генератора над окружающей средой для всех произведенных опытов.

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений				Результаты вычислений	
	t , мин.	ϑ'_B , град.	U_B , в	I_B , а	r_2 , ом	ϑ_B , град.
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

На основании данных таблицы построить кривую $\vartheta_B = f(t)$.

3. Из построенных кривых нагрева отдельных деталей электрических машин установить наибольшие наблюдаемые температуры.

Для тех деталей, у которых тепловое равновесие не наступило, конечную температуру определить графическим методом (рис. 146).

Сравнить значения полученных конечных температур перегрева для всех деталей с величиной перегрева изоляционных материалов, допустимой нормами и дать заключение об использовании обеих машин при установленном режиме работы.

Представить данные по этой части работы таблицей.

№ по пор.	Наименование деталей электрической машины	Наибольшая температура перегрева, град.	
		при опыте	допустимая нормами
1	Обмотка статора		
2	Сталь статора		
3	Подшипник		
4	Обмотка возбуждения		

4. Вычислить методом сопротивлений величину перегрева обмотки статора электродвигателя, сравнить ее с результатом, полученным при измерении термопарой и указать расхождение $\Delta \vartheta_m$ в результатах измерения, выразив его в процентах.

Результаты расчетов представить таблицей.

Температура перегрева обмотки статора, град.		Расхождение $\Delta \vartheta_m$, %
по термопаре	по методу сопротивления	

5. По кривым нагрева определить вышеизложенными способами постоянные времени нагрева обмоток статора, стали статора, подшипника и обмотки возбуждения и указать расхождение в процентах.

Результаты расчетов представить таблицей.

№ по пор.	Наименование деталей электрической машины	Постоянная времени (мин.), определенная		Среднее значение T_n , мин.	Расхождение ΔT_n , %
		графически T'_n	аналитически T''_n		
1	Обмотка статора				
2	Сталь статора				
3	Подшипник				
4	Обмотка возбуждения				

6. По паспортным данным асинхронного электродвигателя трехфазного тока, предназначенного для продолжительного ре-

жима работы, рассчитать его номинальную мощность P_k кратковременного режима для отрезков времени $t_k = 15, 30, 45, 60, 90$ мин., полагая, что $y_m = \frac{M_k}{M_n} = 2$.

При расчете использовать соотношение:

$$P_k = p_m P_n, \quad (5)$$

где p_m — механическая перегрузочная способность, являющаяся функцией отношения $\frac{t_k}{T_n}$ (рис. 150).

P_n — номинальная мощность длительного режима.

Результаты расчетов представить таблицей.

№ по пор.	Время работы электродвигателя t_k , мин.	Номинальная мощность электродвигателя P_k , квт при кратковременном режиме
1	15	
2	30	
3	45	
4	60	
5	90	

На основании таблицы построить график $P_k = f(t_k)$.

7. Прodelать то же для повторно-кратковременного режима работы и расчет произвести по формуле

$$P_{пк_2} = P_{пк_1} \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_2}}, \quad (6)$$

где $P_{пк}$ — мощность электродвигателя при повторно-кратковременном режиме и продолжительности включения $ПВ$.

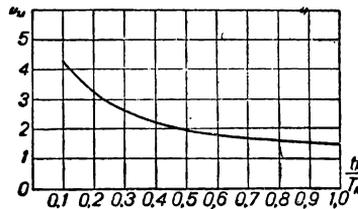


Рис. 150. Зависимость коэффициента механической перегрузки p_m от отношения $\frac{t_k}{T_n}$

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ по пор.	Продолжительность включения электродвигателя $PВ$, проц.	Номинальная мощность электродвигателя при повторно-кратковременном режиме $P_{нк}$, <i>квт</i>
1	15	
2	25	
3	40	
4	60	
5	100	

Пользуясь данными таблицы, составить график $P_{нк} = f(PВ)$.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 327—333, 223.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 582—584, 407—409, 419—421, 577—582.

Бельский И. Р., Бесекаерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 454—457, 284—289, 398—402.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 63—79, 82—84.

Работа № 41

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБНОЙ ДЛЯ ПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА

Цель работы

1. Экспериментально определить мощность, потребную для привода исполнительных механизмов.
2. Выбрать по каталогам электрический двигатель для привода вентилятора.

Основные теоретические положения

Большинство исполнительных механизмов современных промышленных предприятий имеют электрический привод.

Для такого привода, когда не требуется регулировать скорость вращения, обычно применяется наиболее простой, недорогой и надежный в эксплуатации асинхронный электродвигатель трехфазного тока с короткозамкнутым ротором.

При одинаковой скорости вращения ротора электродвигателя и приводимого элемента исполнительного механизма они соединяются между собой муфтой в том случае, когда скорости вращения их различны, связь между ними осуществляется механической передачей.

Наличие приводного электродвигателя дает возможность довольно просто, с достаточно высокой степенью точности, определить мощность, потребную для приведения в действие того или иного исполнительного механизма, в частности вентилятора.

Действительно, если от мощности, потребляемой электродвигателем из сети P_1 , вычесть все, имеющие место в нем потери ΔP , то получим мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = P_1 - \Delta P. \quad (1)$$

Последняя является также мощностью, потребной для привода соответствующего исполнительного механизма в том случае, когда он непосредственно соединен с электродвигателем жесткой или эластичной муфтой.

Если же механическая энергия от электродвигателя передается к исполнительному механизму через ременную передачу, работающую с к. п. д. $\eta = 0,94-0,98$, то мощность P будет

$$P = \eta P_2. \quad (2)$$

Таким образом, для определения мощности, потребной для привода исполнительного механизма, необходимо измерить мощность, потребляемую электродвигателем из сети P_1 , а также опытным путем найти величины всех потерь в нем при имеющем место режиме нагрузки.

Потери в асинхронном электродвигателе можно разделить на механические, магнитные, электрические и добавочные.

Механические и магнитные потери, представляющие собой потери на трение вала в подшипниках, поверхности ротора о воздух, щеток о контактные кольца, а также потери на перемагничивание и вихревые токи в стали статора, часто объединяют в так называемые потери холостого хода P_0 .

Последние определяются как

$$P_0 = P_{1_0} - P_{m_1}, \quad (3)$$

где P_{1_0} — мощность, потребляемая обмотками статора электродвигателя при холостом ходе;

P_{m_1} — мощность, затрачиваемая на нагревание обмоток статора при том же режиме.

Электрические потери, имеющие место в обмотках статора и ротора, представляют собой мощность, затрачиваемую на нагрев проводников, по которым протекает электрический ток.

Электрические или тепловые потери в обмотках статора, соединенных звездой, могут быть определены по формуле

$$P_{m_1} = 3 I_1^2 r_1, \quad (4)$$

где I_1 — ток в проводах, подходящих к электродвигателю;

r_1 — активное сопротивление одной фазы статора.

В случае соединения обмоток статора треугольником формула (4) примет вид

$$P_{m_1} = I_1^2 r_1, \quad (5)$$

так как при данном типе соединения ток, протекающий по каждой обмотке статора будет в $\sqrt{3}$ раз меньше тока в проводах линии, подходящих к электродвигателю.

Величина активного сопротивления обмоток статора r_1 определяется из соотношения

$$r_1 = \kappa_f r_1', \quad (6)$$

где κ_f — коэффициент, учитывающий явление поверхностного эффекта, и принимаемый для обмоток статора, выполненных относительно тонким проводом, равным 1,04—1,12;

r_1' — омическое сопротивление одной фазы статора, определяемое опытным путем методом вольтметра и амперметра.

Электрические потери в обмотках ротора с контактными кольцами, соединенных звездой, определяются совершенно аналогично

$$P_{m_2} = 3 I_2^2 r_2, \quad (7)$$

где I_2 — ток в обмотке ротора;

r_2 — активное сопротивление фазы ротора, приравненное при расчетах омическому сопротивлению r_2' вследствие малой частоты токов в роторе.

Измерение величин r_1' и r_2' желательно производить для нагретого состояния машины при ее установившемся тепловом режиме. Если измерение производилось в холодном состоянии машины, то к найденным значениям омических сопротивлений надо внести соответствующие поправки на температуру.

Электрические потери в роторе с короткозамкнутой обмоткой приближенно определяются соотношением

$$P_{m_2} = \frac{s P_2}{1-s}, \quad (8)$$

где s — величина скольжения, при котором работает электродвигатель.

Добавочные потери P_d принимаются 0,5% от номинальной мощности электродвигателя, т. е.

$$P_d = 0,005 P_n, \quad (9)$$

где P_n — мощность, указанная на паспорте электродвигателя.

Таким образом суммарные потери в асинхронном электродвигателе будут

$$\Delta P = P_0 + P_{m_1} + P_{m_2} + P_d, \quad (10)$$

или, принимая во внимание соотношение (8), уравнение (10) можно написать так

$$\Delta P = P_0 + P_{m_1} + \frac{s P_2}{1-s} + P_d. \quad (11)$$

Подставив найденное значение для суммарных потерь в уравнение (1), после некоторых преобразований найдем мощность на валу электродвигателя

$$P_2 = (1-s) [P_1 - (P_{m_1} + P_0 + P_d)]. \quad (12)$$

Величину скольжения s определим из соотношения

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (13)$$

где $n_1 = \frac{60f}{p}$ — скорость вращения магнитного поля статора;
 n_2 — скорость вращения ротора, измеряемая тахометром.

Однако, определение этим методом величины скольжения s не дает точных результатов, в особенности при малых значениях скольжения, когда n_1 и n_2 мало отличаются друг от друга.

Значительно лучшие результаты дает метод непосредственного измерения скольжения.

При роторе с короткозамкнутой обмоткой для этой цели особенно удобно воспользоваться стробоскопическим способом.

В этом случае скольжение

$$s = \frac{60 \Delta n}{n_1 \Delta t}, \quad (14)$$

где Δn — кажущееся число оборотов стробоскопического диска;
 n_1 — скорость вращения магнитного поля статора, об/мин;
 Δt — время, в течение которого стробоскопический диск, сидящий на валу ротора электродвигателя, совершает Δn кажущихся полных оборотов, сек.

Описание схемы установки

Установка, предназначенная для опытного определения мощности, необходимой для привода вентилятора (рис. 151), состоит из асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором, который через ременную передачу приводит во вращение вентилятор.

Для измерения линейного напряжения U , токов в двух фазах I_1 и I_3 , а также подводимой мощности P_1 в цепи статора находится соответствующая электроизмерительная аппаратура.

Однополюсные рубильники P_k служат для замыкания коротко во время пуска обмоток амперметров A и последовательных обмоток киловаттметра $к\mathcal{W}$, что необходимо во избежание перегрузки приборов пусковыми токами электродвигателя.

Трехполюсный переключатель Π позволяет подводить к обмоткам статора трехфазный ток или присоединять измерительную схему постоянного тока, позволяющую методом вольтметра и амперметра находить их омическое сопротивление.

Для измерения величины скольжения стробоскопическим методом на шкиве электродвигателя укреплен диск δ , разделенный на черные и белые секторы, который освещается неоновой лампой H , питающейся переменным током той же частоты, что и обмотки статора электродвигателя.

Скорость вращения вала вентилятора измеряется при помощи тахометра.

Проведение опыта

1. Собрать схему установки для экспериментального определения мощности, потребной для привода вентилятора.

2. После проверки схемы руководителем присоединить трехполюсным переключателем Π схему постоянного тока к обмоткам статора и, установив движок регулировочного реостата r_p так, чтобы стрелка амперметра давала наименьшее отклонение, убедиться в исправном действии собранной схемы.

3. Переключить трехполюсный переключатель Π в другое положение, замкнуть однополюсные рубильники P_k , после чего включить трехполюсный рубильник P .

4. Убедившись, что вентилятор вращается в необходимую сторону правильно, дать установке проработать некоторое время для установления стационарного режима, после чего записать показания всех приборов, находящихся в цепи статора, измерить с помощью тахометра скорость вращения вала вентилятора и подсчитать целое кажущееся число оборотов диска, сидящего на валу электродвигателя, за 10—20 сек.

Если направление вращения при пуске получилось неправильное, то необходимо выключить установку и переключить концы

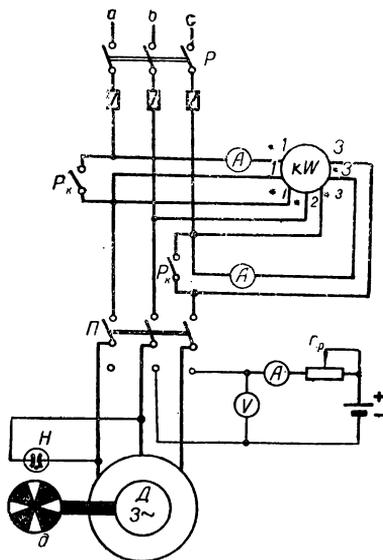


Рис. 151. Схема экспериментального определения мощности, затрачиваемой на привод вентилятора.

обмоток статора для изменения направления вращения ротора на противоположное, после чего снова пустить установку в ход.

5. Выключить трехполюсный рубильник трехфазного тока P , снять ремень, замкнуть однополюсные рубильники P_k накоротко, снова включить трехфазный ток и измерить те же величины, что в пункте четвертом; результаты записать в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, \text{в}$	Ток, a		Подводимая мощность $P, \text{квт}$	Скорость вращения вала вентилятора $n, \text{об/мин}$	Кажущееся число оборотов диска Δn	Время $\Delta t, \text{сек.}$	Примечание
		I_1	I_3					
1								Нагрузка
2								Холостой ход

6. Выключить трехполюсный рубильник трехфазного тока P и как только прекратится вращение ротора электродвигателя сейчас же трехполюсным переключателем Π присоединить к обмоткам статора измерительную схему постоянного тока и записать показания приборов при различных положениях движка регулировочного реостата.

Результаты измерений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, \text{в}$	Ток I, a
1		
2		
3		

7. Составить перечень всей измерительной аппаратуры и оборудования, использованных при испытании электропривода вентилятора и привести их технические данные.

Обработка результатов испытания

1. Определить передаточное число i ременной передачи.
2. Подсчитать величину омического r_1' и активного r_1 сопротивлений одной обмотки статора.

При расчете воспользоваться соотношением

$$r_1' = \frac{U}{2I}, \quad (15)$$

если обмотки статора соединены звездой или зависимостью

$$r_1' = \frac{3U}{2I} \quad (16)$$

при соединении обмоток статора треугольником, где U — показание вольтметра, измеряющего падение напряжения на зажимах статора;

I — ток, потребляемый статорной обмоткой от аккумуляторной батареи.

3. Рассчитать для проведенного опыта величину скольжения s , потери в меди статора $P_{м1}$, потери холостого хода P_0 , добавочные потери P_d , суммарные потери ΔP , мощность на валу электродвигателя P_2 и мощность, потребную для привода вентилятора P .

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений					Результаты вычислений								
	$U, \text{ в}$	$I, \text{ а}$	$P, \text{ квт}$	$\Delta n, \text{ об/мин}$	$\Delta t, \text{ сек.}$	$n_1 - n_2, \text{ об/мин}$	s	$1 - s$	$P_{м1}, \text{ вт}$	$P_0, \text{ вт}$	$P_d, \text{ вт}$	$\Delta P, \text{ вт}$	$P_2, \text{ квт}$	$P, \text{ квт}$
1														

4. Подобрать по каталогам электрических машин электродвигатель, необходимый для привода вентилятора с приведением всех его технических данных.

Литература

- Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 327—329, 332—333, 223.
- Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 407—409, 419—421.
- Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 453—464, 398—402.
- Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 63—65, 70—75, 85—102.

РАЗДЕЛ 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Работа № 42

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЕ МАКСИМАЛЬНОГО ТОКА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ**

Цель работы

1. Изучить конструкцию и работу реле максимального тока электромагнитной системы.
2. Определить токи трогания и возврата, а также коэффициент возврата реле, как функцию токов уставки.
3. Проверить качество исполнения и монтаж отдельных деталей реле.

Основные теоретические положения

Для быстрого автоматического отключения поврежденных элементов электрической системы от неповрежденной части электрические установки снабжаются специальными автоматами-реле, осуществляющими так называемую релейную защиту.

При ненормальных или опасных режимах работы, возникающих в электрической установке, релейная защита должна немедленно реагировать, обеспечивая подачу сигнала или производить отключение тех элементов системы, которые могут вызвать повреждение или аварию.

В тех случаях, когда возникающие в системе ненормальности носят временный, не опасный для нее характер, взамен быстродействующей релейной защиты применяется защита с определенной выдержкой времени.

Наиболее опасным режимом в электрической системе является режим короткого замыкания, при котором ток возрастает до значения, значительно превосходящего номинальное.

Для ликвидации опасного аварийного режима применяется максимальная токовая защита, срабатывающая не только при коротких замыканиях, но также и в тех случаях, когда ток в защищаемом элементе будет превосходить заранее установленную величину.

Это тип защиты, осуществляемый плавкими вставками и применяемый в основном в системах небольшой мощности, не может дать те высокие качества, которые обеспечиваются реле максимального тока.

Такие реле характеризуются автоматическим действием при достижении током определенного значения, когда они мгновенно или через заранее установленный промежуток времени размыкают защищаемую цепь непосредственно (реле прямого действия) или через специальные приспособления, выключающие защищаемый участок системы (реле косвенного действия).

Реле максимального тока обычно бывают электромагнитной, тепловой и индукционной системы и включаются в защищаемую линию непосредственно или через измерительные трансформаторы тока.

Характерными величинами для реле максимального тока являются: ток трогания $i_{p.т}$, т. е. тот наименьший ток, при котором срабатывает реле; ток возврата $i_{p.в}$ — наибольшее значение тока, отвечающее возврату реле в исходное положение, а также отношение

$$k = \frac{i_{p.в}}{i_{p.т}}, \quad (1)$$

называемое коэффициентом возврата, которое для реле максимального тока всегда меньше единицы.

Для реле максимального тока косвенного действия этот коэффициент равен 0,8—0,9.

В реле максимального тока электромагнитной системы магнитное поле создается контролируемым током, протекающим по обмоткам реле. Это магнитное поле влияет на подвижный стальной якорь, который при определенном значении контролируемого тока приходит в движение и приводит к отключению защищаемой части установки.

Так как направление силы притяжения не зависит от направления магнитного поля, а следовательно, и от направления тока в обмотке реле, то последнее может с одинаковым успехом применяться как в цепях постоянного, так и переменного токов.

В реле максимального тока косвенного действия типа ЭТ-520 (рис. 152) магнитная система состоит из сердечника *С*, собранного из листового электротехнической стали, между полюсами которого находится поворотный якорь *Я*, изготовленный в виде изогнутой стальной пластины.

На оси якоря находится противодействующая пружина *П*, натяжение которой можно регулировать перемещением специального рычага *Р*, скользящего по особой шкале *Ш*, проградуированной в величинах, пропорциональных токам трогания.

Обмотка реле выполнена в виде двух секций *I* и *II*, что дает возможность, соединяя их последовательно и параллельно, изменять ток трогания реле при постоянном натяжении пружины *П* в два раза.

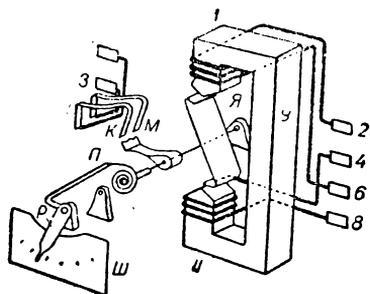


Рис. 152. Схема устройства реле максимального тока.

Если ток, протекающий в обмотках реле, достигнет тока трогания или будет его превышать, то сила, притягивающая якорь *Я*, преодолет сопротивление пружины *П* и силы трения и повернет его, а мостик *М* замкнет контакты реле *К*.

Последние, в свою очередь, замкнут цепь тока, питающего катушку автоматического выключения, в результате чего

произойдет необходимое отключение защищаемого участка электрической системы.

При уменьшении тока в обмотках реле якорь возвращается в свое исходное положение и цепь питания отключающей катушки автомата лишается питания.

Регулирование величины тока трогания можно производить как изменением начального натяжения пружины (в реле типа ЭТ-520 в два раза), так и переключением обмоток с последовательного соединения на параллельное (тоже в два раза).

Таким образом, в реле типа ЭТ-520 изменение тока трогания можно осуществлять в отношении 1 : 4 и устанавливать его конкретное значение при помощи специального рычага *Р*, скользящего по шкале *Ш*, проградуированной в величинах, пропорциональных токам трогания.

Реле подобного рода изготавливаются с контактами: замыкающимися при срабатывании (ЭТ-521), размыкающимися (ЭТ-522) и переключающимися (ЭТ-523) все они потребляют небольшую мощность порядка 0,1 *вт* и срабатывают при двойном токе трогания в течение 0,02—0,03 сек.

Контакты реле рассчитаны на мощность до 50 *вт* при токе замыкания не выше 5 *а*.

Описание схемы установки

Для проверки шкалы токов трогания электромагнитного реле максимального тока косвенного действия типа ЭТ-521 предусматривается питание его обмоток от сети переменного тока *a — b* че-

рез регулировочный реостат r_p и понижающий трансформатор Tp (рис. 153).

Измерение тока, протекающего по обмоткам реле, производится амперметром A , который включен через универсальный измерительный трансформатор тока TT .

К сети постоянного тока через замыкающиеся при срабатывании контакты реле присоединяется сигнальная лампа $ЛС$.

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией реле, составить его эскиз, соединить обмотки $I—II$ последовательно и собрать схему для проверки шкалы токов трогания.

2. Установить рычагом P (рис. 152) по шкале реле $Ш$ наименьший ток уставки i_y , поставить ползунок регулировочного реостата r_p в положение, отвечающее его наибольшему сопротивлению, и *после проверки схемы руководителем* включить двухполюсные рубильники P_1 и P_2 .

3. Постепенно уменьшая сопротивление регулировочного реостата r_p , *очень плавно* увеличивать ток, протекающий по обмоткам реле, до его срабатывания, при котором замкнутся контакты и загорится сигнальная лампа $ЛС$.

Определив по приборам величину тока трогания $i_{p.т}$, *плавно* уменьшать его до тех пор, пока подвижная система не вернется в исходное положение (по затуханию сигнальной лампы судить нельзя!), что будет соответствовать току возврата $i_{p.в}$.

Проделать аналогичные эксперименты при установке рычага на все промежуточные деления шкалы токов уставки и результаты опытов свести в таблицу.

4. Выключить оба рубильника, соединить обмотки реле параллельно, повторить опыты третьего пункта и результаты наблюдений представить в виде таблицы.

5. Проверить работу реле в условиях, близких к короткому замыканию на защищаемом участке системы.

Для этого соединить катушки реле последовательно, настроить реле на минимальный ток уставки, установить такой коэффициент трансформации универсального трансформатора тока, чтобы можно было кратковременно (в течение нескольких секунд) пропустить по обмотке реле ток, превышающий ток трогания в 10—15 раз, не опасаясь за целостность обмотки амперметра A .

После проверки схемы руководителем замкнуть двухполюс-

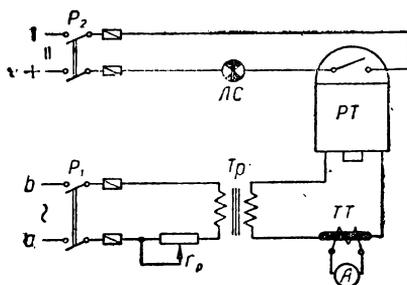


Рис. 153. Схема исследования реле максимального тока.

№ опытов	Уставка тока реле i_y, a	Ток, a	
		трогания $i_{т.р}$	возврата $i_{р.в}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

ный рубильник P_2 , а затем на несколько секунд включить и выключить двухполюсный рубильник P_1 .

При протекании такого большого тока, $i = (10-15)i_y$, сигнальная лампа $ЛС$ должна гореть совершенно спокойно.

Если во время опыта наблюдается мигание сигнальной лампы, это свидетельствует о вибрации контактов реле.

После проведения данного опыта необходимо, не меняя тока уставки, вновь определить токи трогания и возврата и сравнить их со значениями, полученными ранее (пункт третий).

Расхождение измеренных величин более чем на 5—10% свидетельствует о слабом креплении деталей реле.

Результаты, полученные при проведении этих опытов, свести в таблицу.

№ опытов	Уставка тока реле i_y, a	Ток, a			Примечания
		в обмотках реле i	трогания $i_{р.т}$	возврата $i_{р.в}$	
1			—		Определение вибрации контактов
2		—			Определение прочности крепления деталей реле

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении испытания реле.

Обработка результатов испытания

1. Привести эскиз реле максимального тока электромагнитной системы типа ЭТ-521.

2. Подсчитать для всех проведенных опытов величину коэффициента возврата κ и результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Данные наблюдений			Результаты вычислений	Примечания
	i_y, a	$i_{p.т. a}$	$i_{p.в. a}$	κ	
1					Катушки реле соединены последовательно
2					
3					
4					
5					
6					
7					Катушки реле соединены параллельно
8					
9					
10					
11					
12					

3. Построить в одной координатной системе графики, показывающие изменение тока трогания $i_{p.т.}$, тока возврата $i_{p.в.}$ и коэффициента возврата κ от величины уставки тока реле i_y при последовательном соединении катушек реле, а в другой — те же зависимости: $i_{p.т.} = f(i_y)$; $i_{p.в.} = f(i_y)$ и $\kappa = f(i_y)$ при параллельном их соединении.

4. Дать заключение о правильности градуировки шкалы токов трогания, о работе контактов реле в условиях, близких к коротким замыканиям, и о прочности крепления отдельных деталей реле, подтвердив это необходимыми расчетами.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 342—345.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 755—764.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 468—474.

Казанский В. Е., Релейная защита, ГЭИ, 1950, стр. 11—15, 26—27, 33—37, 49—55.

Работа № 43

ИСПЫТАНИЕ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ С ТЕПЛОВЫМ РЕЛЕ

Цель работы

1. Изучить конструкцию магнитного пускателя.
2. Определить напряжения отпуска и втягивания магнитной системы контактора, а также вычислить коэффициент возврата.
3. Ознакомиться с защитой минимального напряжения и максимальной токовой защитой.
4. Установить токи трогания теплового реле и определить выдержку времени при перегрузках.

Основные теоретические положения

Магнитный пускатель является аппаратом с дистанционным управлением и предназначается для частых включений и отключений электрических цепей.

Главным его назначением является включение в сеть асинхронных электродвигателей трехфазного тока с короткозамкнутым ротором путем нажатия пусковой кнопки или воздействием такими вспомогательными аппаратами как: конечный или поплавковый выключатель, реле давления, центробежное реле и пр.

Магнитные пускатели (рис. 154) широко применяются в различных схемах совместного управления несколькими электродвигателями, которые должны пускаться в ход в определенной последовательности, что имеет место в сложных транспортных установках.

Основной деталью магнитного пускателя является специальный электромагнит переменного тока, приводящий в действие особую рычажную систему с контактами.

Такое комплектное устройство называется контактором. Обычно в магнитных пускателях применяют трехполюсный контактор переменного тока, имеющий три пары главных, нормально открытых, контактов K и от одной до четырех пар вспомогательных, блокировочных, или сокращенно, блок-контактов K' .

Последние срабатывают одновременно с главными контактами и могут быть как нормально открытые, так и нормально закрытые, причем нормальным положением контактов считается такое, при котором вся система пускателя обесточена.

В большинстве конструкций магнитных пускателей имеется только одна пара нормально открытых блок-контактов K' , которые включаются параллельно пусковой кнопке $П$.

При наличии большего числа блок-контактов они могут быть использованы для обслуживания цепей управления, блокировки и сигнализации.

Форма контактной поверхности контактов магнитного пускателя выбирается такой, чтобы при включениях и отключениях происходило перекачивание с небольшим проскальзыванием подвижного контакта по неподвижному для обеспечения автоматической очистки их поверхности от нагара.

Сила нажатия контактов, регулируемая натяжением соответствующих пружин, играет большую роль с точки зрения их нагрева и износа.

Существующими нормами допускается наибольшая температура контактов 110° , а величина конечного нажатия их около $1,5-2$ кг на 1 см ширины контакта.

Возникающая при выключениях главных контактов электрическая дуга способствует их разогреву и оплавлению.

Для быстрого гашения электрической дуги у каждого главного контакта K предусматривается специальная искрогасительная катушка $И$, включаемая последовательно с нагрузкой и обеспечивающая необходимое магнитное дутье.

К зажимам $Л1, Л2, Л3$ подводится трехфазная сеть, а к зажимам $С1, С2, С3$ присоединяется нагрузка.

Для управления магнитным пускателем предусматривается кнопочная станция, состоящая из двух кнопок $П$ и $С$, которая располагается отдельно.

Пусковая кнопка $П$, имеет одну пару нормально открытых контактов, а остановочная $С$ — одну пару нормально закрытых.

Обе кнопки имеют автоматический возврат после их нажима в исходное положение, осуществляемый специальными пружинами.

При нажиме пусковой кнопки $П$ замыкается цепь катушки K в результате чего, при номинальном напряжении в сети, магнитная система, набранная для уменьшения потерь от вихревых токов из шихтованной электротехнической стали, намагничивается настолько, что якорь контактора приходит в движение.

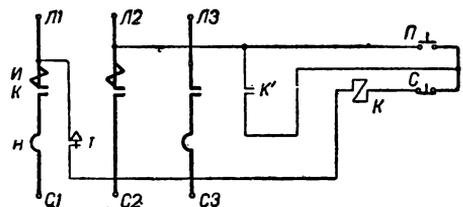


Рис. 154. Принципиальная схема трехполюсного магнитного пускателя с кнопочной станцией.

По мере притяжения якоря величина воздушного зазора в магнитной системе уменьшается, индуктивное сопротивление катушки увеличивается и достигает наибольшего значения при притянutom якоря, когда замыкаются главные контакты K и срабатывают все имеющиеся блок-контакты K' .

Вследствие непостоянства величины индуктивного сопротивления катушки контактора, потребляемый ею ток во время движения якоря будет изменяться.

В первый момент включения наблюдается большой всплеск тока $I_{\text{раз}}$, который при движении якоря постепенно уменьшается и доходит до своего наименьшего значения $I_{\text{зам}}$, соответствующего срабатыванию всех контактов электромагнитного контактора.

Соотношение между величинами $I_{\text{раз}}$ и $I_{\text{зам}}$ зависит от величины воздушного зазора и формы магнитной системы. В существующих конструкциях оно колеблется от 3 до 15.

Замкнувшиеся главные контакты K подают напряжение к потребителю через нагревательные элементы H теплового реле T , а одновременно включившиеся блок-контакты K' создают соединение, параллельное пусковой кнопке P , вследствие чего как отпуск, так и повторное нажатие этой кнопки никакого эффекта на работу контактора производить в дальнейшем не будут, так как катушка K будет питаться через замкнувшиеся блок-контакты K' .

Для размыкания главных контактов K надо нажать остановочную кнопку C . При этом прерывается цепь питания катушки электромагнитной системы контактора и происходит выпадение якоря под действием собственного веса или выключающей пружины.

Выпадение якоря сопровождается размыканием главных контактов K и блок-контактов K' , через которые питается катушка K .

Последующее включение может быть осуществлено подачей нового механического импульса пусковой кнопке P .

Катушка магнитного пускателя K рассчитана для работы при напряжении 85—110% по отношению к номинальному.

Длительное повышение напряжения сверх номинального не должно превышать 10%, во избежание возникновения опасного перегрева обмотки и возрастания силы механических ударов при включениях контактора, что сказывается на сокращении срока службы магнитного пускателя.

Если напряжение понизится ниже 85% от номинального, то сила притяжения якоря значительно уменьшится и при некотором значении напряжения произойдет отрыв якоря, сопровождающийся выключением магнитного пускателя.

Это напряжение называется напряжением отпуска $U_{\text{отп}}$.

То наименьшее напряжение, при котором происходит включение контактора, называется напряжением втягивания $U_{\text{втг}}$.

Отношение напряжения отпуска к напряжению втягивания

$$\kappa = \frac{U_{\text{отп}}}{U_{\text{втяг}}} \quad (1)$$

принято называть коэффициентом возврата.

Автоматическое выключение магнитного пускателя при резком снижении или полном исчезновении напряжения в сети без последующего самостоятельного включения (самопуска) при восстановлении напряжения до номинального значения обеспечивают так называемую *защиту минимального напряжения*.

Максимальная токовая защита осуществляется в магнитном пускателе двух- или трехполюсным реле максимального тока тепловой системы.

Каждый его полюс имеет нагревательный элемент H , включенный последовательно с главным контактом K .

При протекании нагрузочного тока нагревательный элемент разогревается и передает тепло распложенной вблизи его металлической пластинке, выполненной из биметалла, которая начинает деформироваться и воздействует на устройство, размыкающее при определенной нагрузке $i_{p.t}$ контакты теплового реле T .

Последние разрывают цепь питания катушки K и происходит автоматическое выключение контактора.

Тот наименьший ток $i_{p.t}$, при котором срабатывает реле, называется током трогания.

Последующее включение контактора после срабатывания максимальной токовой защиты возможно произвести только после возвращения контактов теплового реле в исходное положение, что осуществляется при помощи кнопки возврата, или автоматически специальной пружиной по истечении некоторого промежутка времени (порядка 0,5—3 мин.), достаточного для охлаждения биметаллических пластин и частично того оборудования, которое обслуживается магнитным пускателем.

Для получения более совершенной защиты электрооборудования от перегрузок следует его и магнитный пускатель ставить в одинаковые условия по отношению к температуре окружающей среды.

В некоторых конструкциях магнитных пускателей для регулирования величины тока трогания $i_{p.t}$ имеется особый регулировочный винт, воздействующий на механизм расцепления контактов теплового реле.

Однако максимальная токовая защита, осуществляемая тепловым реле T , дает при небольших перегрузках значительную выдержку времени, в течение которого электрооборудование, питаемое через магнитный пускатель, несколько перегревается.

При больших перегрузках тепловое реле срабатывает довольно быстро, обеспечивая вполне удовлетворительную максимальную токовую защиту.

Так как тепловое реле не может мгновенно реагировать на токи короткого замыкания, а, кроме того, главные контакты магнитного пускателя не могут разрывать ток нагрузки, выше десятикратного по отношению к номинальному, то наряду с тепловым реле при применении магнитных пускателей необходимо устанавливать еще плавкие предохранители. Последние защищают установку от действия токов короткого замыкания.

Описание схемы установки

Для испытания магнитного пускателя его внутренние элементы соединяются по специальной схеме в пять параллельных цепей (рис. 155).

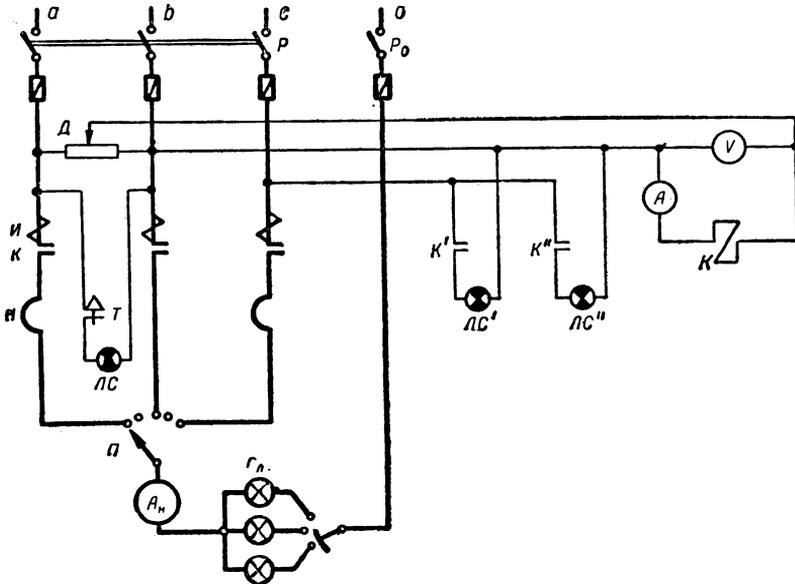


Рис. 155. Схема испытания магнитного пускателя с тепловым реле.

Первая цепь состоит из катушки контактора K , питаемой от делителя напряжения D . Вольтметр V и амперметр A служат для измерения напряжения на концах катушки K и потребляемого ею тока.

Вторая цепь, включаемая поочередно переключателем Π по отдельным фазам a, b, c , имеет искрогасительную катушку $И$, главный контакт $К$, нагревательный элемент $Н$ теплового реле, амперметр A_n , измеряющий ток нагрузки, и ламповый реостат $r_{л}$.

Третья цепь состоит из последовательного соединения контактов теплового реле T и сигнальной лампы $ЛС$.

Нормально открытые K' и нормально закрытые K'' блок-контакты совместно со своими сигнальными лампами $ЛС'$ и $ЛС''$ образуют четвертую и пятую параллельные цепи.

Питание экспериментальной установки осуществляется от четырехпроводной сети трехфазного тока a, b, c, o .

Проведение опыта

1. Ознакомиться с конструкцией магнитного пускателя и зарисовать эскиз его магнитной цепи.

2. Собрать схему для испытания магнитного пускателя.

3. Выключить переключателем все лампы в ламповом реостате, установить переключатель фаз Π на контакт нагревательного элемента H , находящегося в первой фазе a , поставить ползунок делителя напряжения D в положение, отвечающее наименьшему значению напряжения, подводимого к катушке магнитного пускателя, и после проверки собранной схемы руководителем включить трехполюсный рубильник P .

4. Постепенно, перемещая ползунок делителя напряжения D , увеличивать напряжение на катушке магнитного пускателя и определить величину напряжения втягивания $U_{втяг}$.

5. Медленно снижать напряжение на катушке магнитного пускателя и определить напряжение отпуска $U_{отп}$.

Результаты наблюдений по четвертому и пятому пунктам записать в таблицу.

№ опытов	Напряжение на катушке магнитного пускателя, в	
	$U_{втяг}$	$U_{отп}$
1	—	—
2	—	—

6. Удерживая рукой магнитную систему пускателя за изолированную часть в положении, отвечающему разомкнутым главным контактам, подвести к катушке контактора номинальное напряжение U_n и измерить ток, потребляемый ее обмоткой $I_{раз}$.

7. Отпустить магнитную систему и после срабатывания контактора измерить ток при включенном пускателе $I_{зам}$.

Результаты наблюдений по шестому и седьмому пунктам свести в таблицу.

№ опытов	Ток, потребляемый катушкой при магнитной системе	
	разомкнутой $I_{раз}, a$	замкнутой $I_{зам}, a$
1	—	—
2	—	—

8. Установить на катушке контактора номинальное напряжение и приступить к исследованию максимальной токовой защиты, осуществляемой тепловым реле.

9. Настроить регулировочным винтом, если такой предусмотрен конструкцией теплового реле, реле на наименьший номинальный ток и в дальнейшем его не трогать.

10. Установить переключатель фаз Π на контакт первой фазы a , включить однополюсный рубильник P_0 и включением некоторого количества ламп установить ток заведомо ббльший номинального (например, если $i_n = 8 a$, то следует установить ток 15—17a).

Как только тепловое реле сработает и контакты его разомкнутся (погаснет сигнальная лампа $ЛС$), уменьшить ток до $i < i_n$ (например, до 6—7a) и спустя некоторое время, необходимое для охлаждения и замыкания контактов теплового реле с самовозвратом (загорается сигнальная лампа $ЛС!$), вновь увеличить ток до значения $i > i_n$, но меньшего, чем в первом опыте (например, установить 10—12a). После срабатывания реле вновь уменьшить ток, но уже до большей величины (например, до 7,5 a) и подождать, когда контакты теплового реле вновь замкнутся.

Опыт следует проводить до тех пор, пока разница между токами не будет порядка 5—10% от их среднего арифметического значения.

Примечание. При испытании магнитного пускателя с тепловым реле, имеющим ручной возврат, необходимо после срабатывания реле периодически нажимать на кнопку возврата для того, чтобы добиться каждый раз замыкания его контактов.

Результаты испытаний свести в таблицу.

№ опытов	Ток нагрузки, при котором происходит		Примечание
	размыкание контактов $i_{раз} \cdot a$	замыкание контактов $i_{зам} \cdot a$	
1			Испытание нагревательного элемента фазы a
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

11. Прodelать аналогичное исследование с нагревательными элементами фаз b и c , представив результаты испытания в виде аналогичных таблиц.

При проведении испытания во избежание сильного обгорания контактов переключатель фаз Π следует переключать *только* при выключенном трехполюсном рубильнике P .

12. После охлаждения нагревательных элементов приступить к пофазному определению времени выдержки теплового реле при двукратном токе трогания.

Установить переключатель фаз Π на контакт охладившегося элемента первой фазы a , включить нагрузку, близкую к двойному току трогания $2 i_{p.т}$, после чего замкнуть трехполюсный рубильник P и *одновременно* пустить секундомер.

Во время опыта поддерживать ток нагрузки неизменным, равным двойному току трогания $i = 2 i_{p.т} = \text{const}$.

После срабатывания реле (погаснет сигнальная лампа $ЛС$) остановить секундомер и определить величину выдержки времени на фазе a .

Аналогичные исследования провести с другими двумя нагревательными элементами и результаты наблюдений представить таблицей.

№ опытов	Ток i, a	Выдержка $t, \text{сек.}$	Фаза
1			a
2			b
3			c

13. Составить перечень аппаратуры, использованной при эксперименте, и привести ее подробные технические данные.

Обработка результатов испытания

1. Составить эскиз магнитной цепи пускателя и дать его краткое описание.

2. Дать заключение о правильности работы блок-контактов магнитного пускателя.

3. Рассчитать коэффициент возврата для катушки контактора.

4. Привести величины наименьших токов трогания по всем полюсам теплового реле, определяя их как

$$i_{p.т} = \frac{i_{\text{раз}} + i_{\text{зам}}}{2}, \quad (2)$$

где $i_{\text{раз}}$ и $i_{\text{зам}}$ — токи, отличающиеся не более чем на 5—10% от $i_{p.т}$, которые вызывают соответственно срабатывание и обеспечивают возврат контактов теплового реле в исходное положение.

Результаты расчетов представить таблицей.

№ опытов	Ток трогания $i_{p.т.а}$	Фаза
1		<i>a</i>
2		<i>b</i>
3		<i>c</i>

5. Анализируя значения полученных выдержек времени теплового реле, настроенного на минимальный ток трогания по фазам при двойной его перегрузке, дать заключение о правильности настройки отдельных элементов теплового реле и способе корректировки настройки.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 337—338.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, 709—712.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 467—474.

Казанский В. К., Релейная защита, ГЭИ, 1950, стр. 110—114.

РАЗДЕЛ 10

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОАВТОМАТИКИ

Работа № 44

ИССЛЕДОВАНИЕ И НАСТРОЙКА СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С КОНТАКТНЫМИ КОЛЬЦАМИ

Цель работы

1. Изучить, собрать и настроить схему автоматического пуска асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами в функции времени.
2. Проверить действие максимальной токовой защиты установки.
3. Определить время выдержки при срабатывании теплового реле при заданной перегрузке электропривода.

Основные теоретические положения

Для возможности пуска электрифицированного агрегата в ход электродвигатель должен обеспечить момент на валу

$$M = M_c + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (1)$$

где M — момент статических сопротивлений, приведенный к валу электродвигателя;

GD^2 — маховой момент агрегата, приведенный к валу электродвигателя;

$\frac{dn}{dt}$ — изменение скорости по времени в процессе разбега электрифицированного агрегата.

Пусковые свойства асинхронного электродвигателя с контактными кольцами определяются семейством кривых $M = f(s)$, параметром для которых является величина активных сопротивлений, введенных в цепь ротора.

Такие кривые, составленные в относительных единицах, представлены на рис. 156.

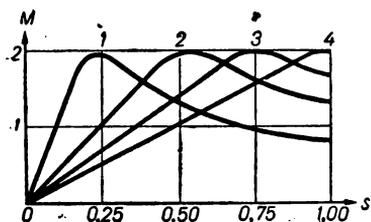


Рис. 156. Зависимость вращающегося момента асинхронного электродвигателя от скольжения при различных значениях величины активных сопротивлений, введенных в цепь ротора.

Кривая 1 отвечает короткозамкнутому кольцам, т. е. является естественной характеристикой, а кривые 2, 3, 4 определяются различным значением пусковых сопротивлений в цепи ротора и представляют собой искусственные характеристики.

Таким образом, в асинхронных электродвигателях с контактными кольцами пусковой момент является функцией величины пусковых сопротивлений, введенных в цепь ротора.

При надлежащем выборе величины пусковых сопротивлений пусковой момент может принять необходимое значение и даже достичь критического значения (кривая 4).

Для поддержания достаточно большого значения величины момента в процессе разбега электрифицированного производственного механизма необходимо во время пуска постепенно уменьшать величину пусковых сопротивлений в цепи ротора.

Изменение величины активных сопротивлений, введенных в цепь ротора, сопровождается толчками тока, которые обычно находятся в пределах $I \equiv (I_n - 1,5 I_n)$ и только при тяжелых условиях пуска доходят до $2,5 I_n$, где I_n — номинальный ток электродвигателя.

Первоначальный толчок тока определяется величиной пусковых сопротивлений, которые рассчитываются для каждого электродвигателя с учетом условий его пуска (средние, тяжелые).

Последующие толчки тока, получающиеся при закорачивании отдельных ступеней, зависят от моментов переключения в цепи ротора.

Так как ручное управление не может обеспечить должное качество пуска, то в современных установках этот процесс при часто пускаемых электроприводах обычно автоматизирован.

Наибольшее распространение получили схемы автоматического пуска в функции времени, которые для своего практического осуществления требуют наличия механических, электромагнитных или электронных реле времени.

Подобная типичная схема автоматизированного пуска асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами в функции времени приведена на рис. 157.

В схеме все контакторы, кроме $3У$, имеют маятниковые реле времени, контакты которых на схеме управления обозначены $Л$, $1У$, $2У$.

При нажатии пусковой кнопки $П$ включается линейный контактор $Л$, который подводит напряжение сети к обмоткам статора.

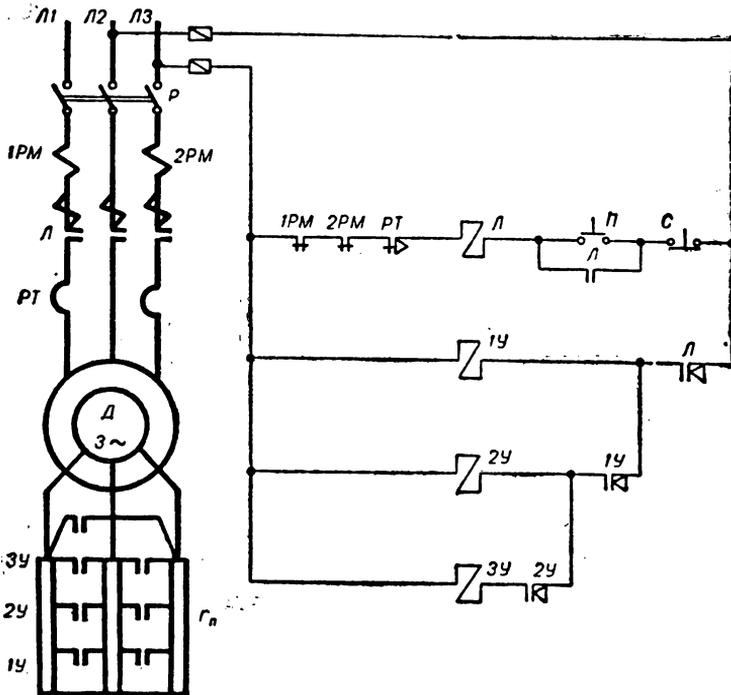


Рис. 157. Схема управления асинхронным электродвигателем с контактными кольцами в функции времени.

При втягивании якоря контактора $Л$ начинает работать пристроенное к нему маятниковое реле, которое после установленной выдержки времени замыкает свой нормально открытый контакт $Л$ и подает питание первому контактору ускорения $1У$, который замыкает накоротко первую ступень пусковых сопротивлений.

Через определенный промежуток времени маятниковое реле контактора $1У$ замкнет свой нормально открытый контакт $1У$, включит контактор ускорения $2У$ и т. д., пока не произойдет замыкание последнего контактора ускорения $3У$.

Ввиду того, что контакты последнего контактора ускорения $3У$ несут длительную нагрузку, контактор выбирается трехполюсный, а контакты его включаются по способу треугольника.

При отсутствии контакторов с маятниковыми реле времени

схема несколько изменяется — используются обычные контакторы и электромагнитные или электронные реле времени.

Защита электродвигателя от перегрузки осуществляется тепловым реле *РТ*, а от коротких замыканий — реле максимального тока мгновенного действия *1РМ* и *2РМ*.

Защита минимального напряжения осуществляется линейным контактором *Л*, который выпадает при значительном снижении или полном исчезновении напряжения.

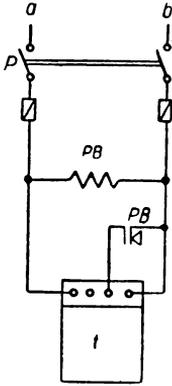


Рис. 158. Схема для определения величины уставки реле времени.

Остановка электродвигателя производится нажимом остановочной кнопки *С*, разрывающей питание катушки линейного контактора *Л*.

Настройка схемы сводится к регулированию толчков тока при пуске электродвигателя.

Измерение последних лучше всего производить самопишущим амперметром, а в ответственных случаях использовать для этой цели осциллограф.

В исключительных случаях, допускающих измерение толчков тока с точностью до $\pm 10\%$ от их истинного значения, возможно применять стрелочные приборы.

Для этого при снятом стекле прибора стрелка амперметра отводится вручную посредством тонкого стержня на показание, соответствующее предполагаемому толчку тока, после чего нажимается пусковая кнопка *П*.

Если стрелка едва отошла от своего положения, то по ее отклонению можно определить толчок тока. В противном случае опыт необходимо повторить.

Первоначальный толчок тока определяется величиной пускового сопротивления, а толчок при закорачивании отдельных пусковых ступеней зависит от величины уставок реле времени.

Величину толчков тока при пуске можно регулировать путем изменения уставок реле времени.

Измерение выдержки времени реле удобно производить по схеме, приведенной на рис. 158.

При замыкании рубильника *Р* начинает одновременно работать реле времени *РВ* и электрический секундомер *t*.

Замыкающийся контакт реле *РВ* через некоторое время закорачивает зажимы секундомера и вызывает его остановку.

Сравнением показания стрелки секундомера с уставкой по шкале реле судят о правильности градуировки реле времени.

Проверка действия максимальной токовой защиты при небольших перегрузках сводится к определению времени срабатывания теплового реле, а при мгновенных перегрузках, превышающих токи уставок реле мгновенного действия, — к наблюдению за работой этих реле, которые должны немедленно вызвать отключение всей установки от питающей сети.

Описание схемы установки

Опытная установка представляет собой схему автоматического пуска асинхронного электродвигателя с контактными кольцами в функции времени (рис. 159).

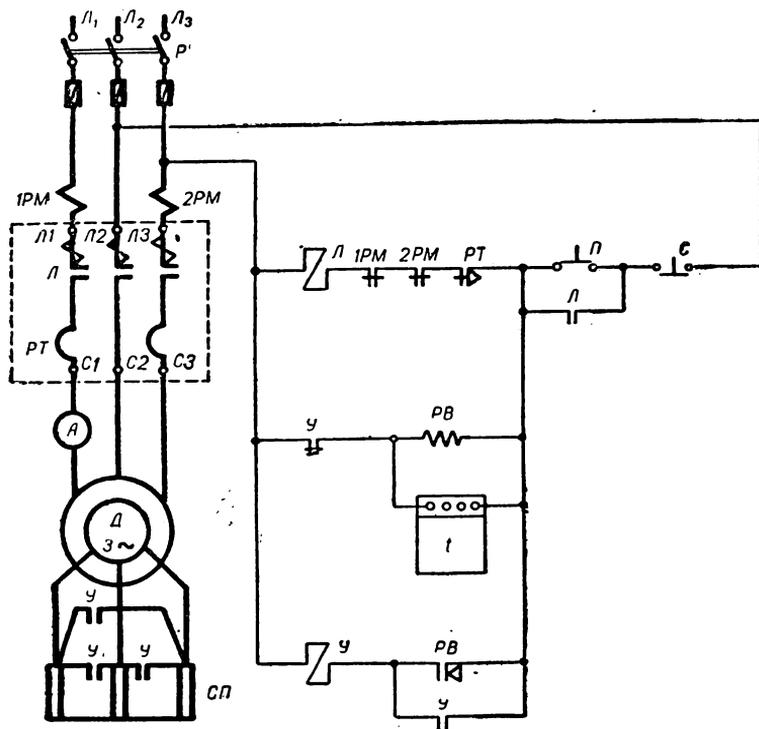


Рис. 159. Схема исследования и настройки автоматического пуска асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами.

В цепи ротора предусматривается одна пусковая ступень $СП$, которая закорачивается контактами контактора ускорения $У$.

Включение контактора ускорения $У$ осуществляется контактом $РВ$ реле времени $РВ$ через установленный промежуток времени после того, как линейным контактором \mathcal{L} будет подано напряжение на обмотки статора электродвигателя.

Блокировочный нормально закрытый контакт $У$ после срабатывания контактора ускорения $У$ отключает обмотку электромагнитного реле времени $РВ$ и электрический секундомер с ручным возвратом, по которому определяется действительная величина уставки реле $РВ$.

Максимальная токовая защита осуществляется электромагнитными реле мгновенного действия *1РМ* и *2РМ*, а также тепловым реле *РТ*.

Нагрузка на электродвигатель создается при помощи тормоза любой конструкции.

Проведение опыта

1. Собрать схему исследования и настройки автоматического пуска асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами.

2. Настроить реле *1РМ* и *2РМ* на двойной номинальный ток электродвигателя, дать некоторую уставку времени на реле *РВ* и после проверки схемы руководителем произвести пробный пуск установки.

3. Измерить первый и второй толчок тока при срабатывании линейного контактора *Л* и контактора ускорения *У* амперметром *А* со снятым стеклом и длинным тонким стержнем, предназначенным для установления стрелки прибора в положение, отвечающее величине предполагаемого толчка тока.

Если толчки токов будут отличаться от их среднего значения больше чем на $\pm 10\%$, то изменением величины уставки реле *РВ* добиться такого положения, чтобы при пуске они были близки друг к другу.

Результаты настройки свести в таблицу.

№ опыта	Толчки тока		Уставка реле <i>РВ</i> t_y , сек.	Показание секундомера t , сек.
	первый	второй		
	I_1, a	I_2, a		
1				
2				
3				
4				
5				

4. Проверить действие максимальной токовой защиты мгновенного действия.

Для этого пустить установку в ход и быстро при помощи тормоза увеличивать нагрузку на электродвигатель, заметив по амперметру тот ток, при котором реле *1РМ* и *2РМ* разомкнут свои контакты и произойдет автоматическая остановка машины.

Данные наблюдений свести в таблицу

№ опытов	Ток уставки реле <i>1PM</i> и <i>2PM</i> I_y, a	Ток срабатывания $I_{рт}, a$
1		

5. Испытать действие тепловой защиты. Для этого нагрузить электродвигатель тормозом до полуторного номинального тока и определить время срабатывания теплового реле *PT*.

Результаты отсчетов по приборам дать в виде таблицы.

№ опытов	Ток, потребляемый электродвигателем из сети I, a	Время срабатывания теплового реле $t, \text{сек.}$
1		

6. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при проведении опыта, с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Дать подробное описание исследованной схемы автоматического пуска асинхронного электродвигателя с контактными кольцами, порядок ее настройки и проверки работы отдельных элементов схемы.

2. Высказать соображения о правильности градуировки шкалы уставок реле времени *PB*.

3. Дать заключение о правильности градуировки шкал уставок реле максимального тока *1PM* и *2PM*.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 212—217, 337—338, 342—345.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 409—419, 434—436, 709—712, 755—764.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 383—394, 467—478.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, Гостехиздат УССР, 1956, стр. 157—159.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И НАСТРОЙКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ, ЗАЩИТЫ, БЛОКИРОВКИ И СИГНАЛИЗАЦИИ
СЛОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ**

Цель работы

1. Изучить и настроить автоматическую схему пуска и блокировки нескольких асинхронных электродвигателей трехфазного тока с короткозамкнутым ротором, включаемых в определенной последовательности.
2. Ознакомиться со схемами защиты минимального напряжения и максимальной токовой защиты.
3. Изучить схемы сигнализации и конструкции светящегося сигнализационного щита с мнемонической схемой установки.
4. Определить время выбега электродвигателей, приводящих в движение отдельные производственные агрегаты.

Основные теоретические положения

Некоторые промышленные установки, вследствие специфичности технологического процесса, требуют определенной очередности включения или выключения электродвигателей, приводящих в движение отдельные агрегаты.

Изменение очередности этих операций может нарушить технологический процесс, а также привести к порче оборудования.

В частности, транспортные установки элеваторов, представляющие собой сложные сочетания транспортеров, норий и подобных им устройств с одиночными электроприводами во избежание завалов отдельных звеньев транспортируемым продуктом, требуют пуска электродвигателей в определенной последовательности.

Такие установки с машинами непрерывного транспорта обычно оборудуются асинхронными электродвигателями трехфазного тока с короткозамкнутым ротором.

Последние обладают необходимыми пусковыми качествами, отличаются высокой надежностью в работе, не требуют большого ухода при эксплуатации и позволяют простыми средствами осуществить автоматическое управление.

Под автоматическим управлением понимают такой процесс, который, будучи начат тем или иным импульсом, в дальнейшем протекает без вмешательства со стороны обслуживающего персонала и прекращается, когда определенная его стадия будет закончена.

В частности, сложные транспортные установки требуют осуществления комплексной автоматизации, предусматривающей

пуск электродвигателей в определенной последовательности, остановку всех машин в тех случаях, когда по какой-либо причине одна из них, входящая в транспортируемый поток, останавливается, а также допускающей пропуск отдельных машин без введения в действие всей установки, что необходимо при выполнении отдельных наладочных режимов.

Практическое осуществление такой комплексной автоматизации может быть легко выполнено с помощью обычных магнитных пускателей, в цепях управления которых предусмотрена соответствующая блокировка и установлена специальная аппаратура.

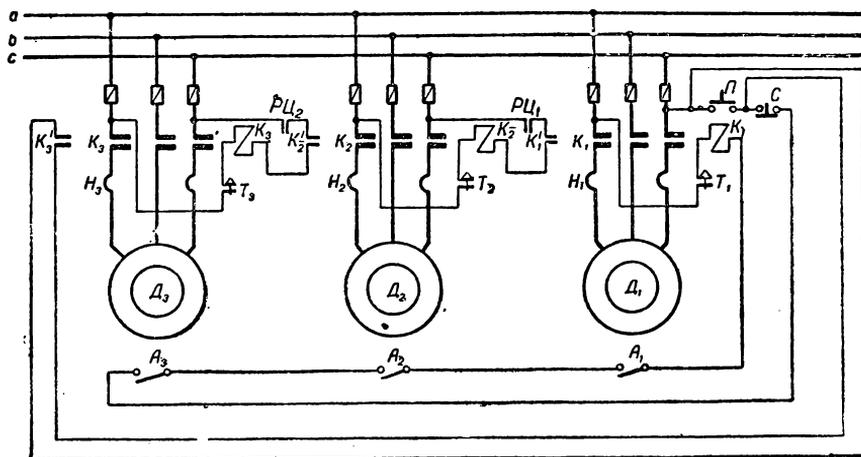


Рис. 160. Схема блокировки цепей управления магнитных пускателей по способу дополнительных контактов.

Электрическая блокировка может быть выполнена по способу дополнительных контактов, который заключается в том, что одновременно с замыканием линейных контактов, обслуживающих электродвигатель последующего по ходу транспортируемого продукта исполнительного механизма, замыкаются также его нормально открытые блок-контакты, которые введены в цепь управления электродвигателя, приводящего в движение предыдущий исполнительный механизм, что обеспечивает определенный порядок запуска электродвигателей в ход.

Например, на схеме, представленной на рис. 160, сначала придет во вращение электродвигатель D_1 , затем D_2 и, наконец, D_3 .

Блокировку цепей магнитных пускателей можно выполнить и по способу непосредственной связи.

В этом случае цепь катушки магнитного пускателя, обслуживающего электродвигатель предыдущего по ходу транспортируемого продукта исполнительного механизма, может быть включена после замыкания линейных контактов магнитного пускателя,

который включает электродвигатель последующего исполнительного механизма.

На рис. 161 представлена такая блокировка, благодаря которой электродвигатели включаются в следующем порядке: D_1, D_2, D_3 .

Управление транспортными установками на элеваторах производится диспетчером с центрального пункта.

Для осведомления дежурного персонала диспетчерской о работе отдельных транспортных машин или их приводных электродвигателей широко применяется световая сигнализация.

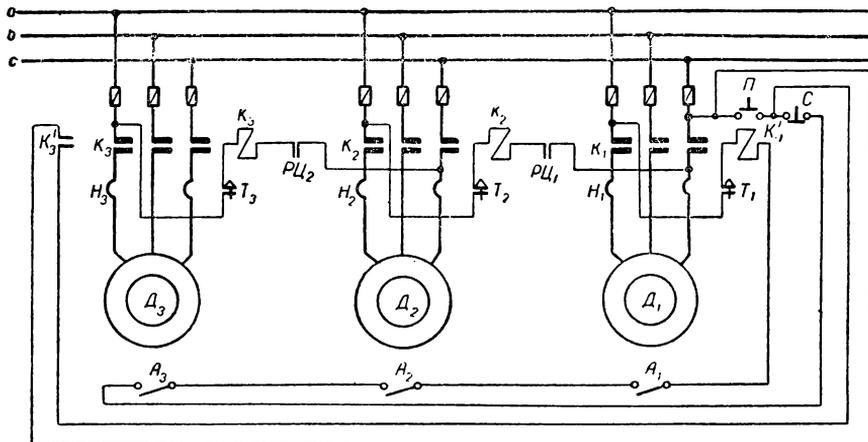


Рис. 161. Схема блокировки цепей управления магнитных пускателей по способу непосредственной связи.

Обслуживаются сигнализационные цепи частью нормально открытых или нормально закрытых блок-контактов магнитных пускателей, которые включают и выключают приводные электродвигатели главными контактами.

Конструктивно сигнализационные устройства часто оформляются в виде светящихся щитов с мнемоническими схемами.

Последние содержат все элементы транспортной установки, которые при работе соответствующих машин светятся одним цветом (красным), а при остановке остаются неосвещенными (темные мнемонические схемы) или светятся другим (зеленым или белым) цветом (светящиеся мнемонические схемы).

Пуск транспортной установки производится нажатием пусковой кнопки Π , в результате чего первым включается магнитный пускатель того электродвигателя, который приводит в движение транспортную машину, завершающую производственный процесс. Вслед за ним, благодаря примененной блокировке, включается следующий магнитный пускатель и т. д.

При срабатывании каждого магнитного пускателя замыкаются его главные или линейные контакты и включается в работу та

или иная часть сложной транспортной установки. Одновременно с этим замыкаются и размыкаются соответствующие нормально открытые и нормально закрытые блок-контакты, которые автоматически включают и выключают сигнальные лампы, в результате чего на мнемонической схеме включенные механизмы и электродвигатели начинают освещаться другим цветом (красным).

Когда вся мнемоническая схема осветится полностью другим (красным) цветом пусковая кнопка *П* может быть отпущена, так как при включении последнего магнитного пускателя она шунтируется его нормально открытыми блок-контактами K_3' (рис. 160 и 161).

Остановка всей транспортной установки производится нажатием остановочной кнопки *С*, прерывающей питание цепей управления магнитных пускателей, обслуживающих приводные электродвигатели.

Кроме центральной остановочной кнопки *С*, находящейся в диспетчерской, непосредственно у самих исполнительных механизмов устанавливаются аварийные выключатели A_1 , A_2 и A_3 , которыми пользуется обслуживающий персонал при авариях или несчастных случаях.

Аварийные выключатели вводятся в цепи управления магнитных пускателей последовательно и при их размыкании происходит остановка всей установки.

Помимо этого, в цепи управления магнитных пускателей вводятся нормально открытые контакты центробежных реле $PЦ_1$ и $PЦ_2$.

Эти реле устанавливаются на приводных транспортных механизмах со сторон, противоположных электродвигателям, и замыкают свои контакты при достижении скорости ленты, близкой к номинальной.

Введение нормально открытых контактов таких реле в цепи управления магнитных пускателей электродвигателей исключает завалы оборудования транспортируемым продуктом при обрывах ленты и, кроме того, создает необходимую выдержку времени при включениях электродвигателей, устраняя этим наложение пусковых токов друг на друга.

Во всех транспортных установках с централизованным пуском предусматриваются особые приспособления, так называемые деблокирующие устройства, дающие возможность осуществлять индивидуальное управление исполнительными механизмами, что может оказаться необходимым при испытании, наладке и ремонте транспортной машины.

Максимальная токовая защита электрооборудования сложной транспортной установки осуществляется плавкими предохранителями и тепловыми реле магнитных пускателей, а защита минимального напряжения, исключающая самозапуск установки при последующем появлении напряжения, — катушками контакторов магнитных пускателей.

Описание схемы установки

Исследуемая модель транспортной установки элеватора, изображенная на мнемонической схеме (рис. 162), имеет комплексную автоматизацию электродвигателей подсилосного транспортера, норрии и надсилосного транспортера.

Все исполнительные механизмы приводятся в движение асинхронными электродвигателями трехфазного тока с короткозамкнутым ротором — D_1 , D_2 и D_3 .

Управление, защита, блокировка, а также сигнализация осуществляется при помощи магнитных пускателей, представляющих собой сочетание в одном стальном ящике трехполюсного электромагнитного контактора переменного тока с двухполюсным тепловым реле, имеющим ручной возврат, и тремя парами блок-контактов, из которых две нормально открытые и одна нормально закрытая.

В соответствии с производственным процессом электродвигатели пускают в следующей последовательности: сначала электродвигатель D_1 , приводящий в движение надсилосный транспортер, за ним электродвигатель норрии D_2 и, наконец, электродвигатель подсилосного транспортера D_3 .

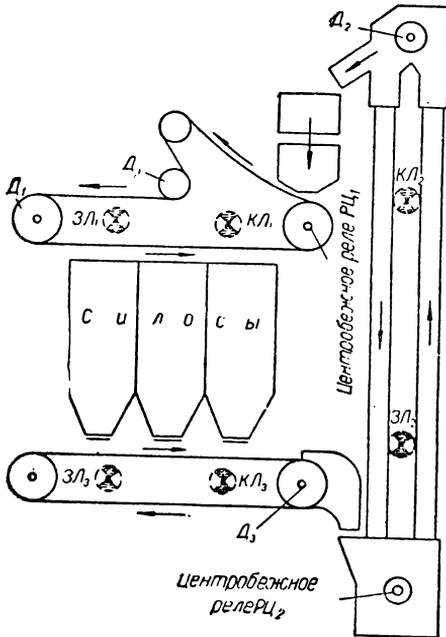


Рис. 162. Схема транспортной установки элеватора.

Такому требованию может удовлетворить целый ряд различных электрических схем.

На рис. 163 представлена одна из таких схем с блокировкой цепей управления магнитных пускателей по способу дополнительных контактов.

В данной схеме питание обмоток статоров электродвигателей предусматривается от сети трехфазного тока a, b, c , которая подводится к ним через главные контакты K_1, K_2, K_3 , замыкающихся при обтекании соответствующих катушек K_1, K_2, K_3 током управления.

В главной цепи каждого магнитного пускателя для защиты от токов короткого замыкания имеются плавкие предохранители

Π_1, Π_2, Π_3 ; нагревательные элементы H_1, H_2, H_3 тепловых реле обеспечивают при перегрузках размыкание контактов T_1, T_2, T_3 , которые вызывают разрыв цепей управления и отключение перегруженных электродвигателей, а вместе с ними всей установки.

Нормально закрытые блок-контакты K''_1, K''_2, K''_3 используются для включения зеленых сигнальных ламп $ЗЛ_1, ЗЛ_2, ЗЛ_3$ при выключенных электродвигателях $Д_1, Д_2, Д_3$.

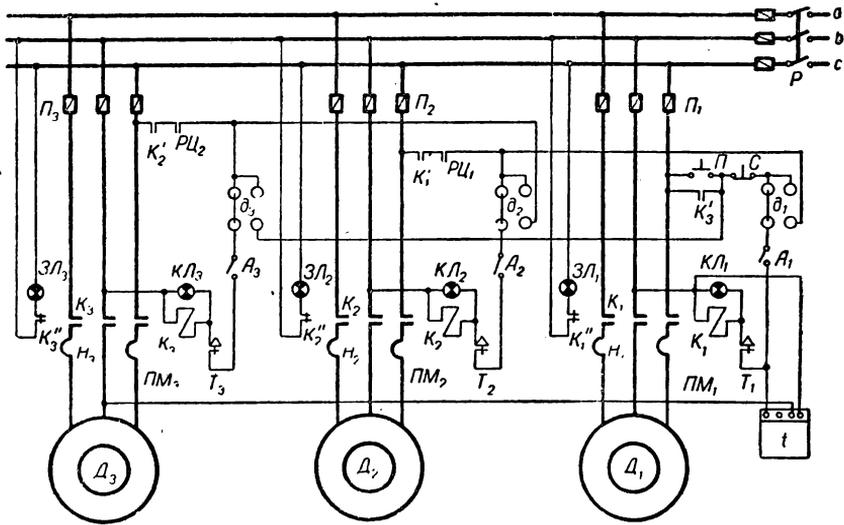


Рис. 163. Электрическая схема главных цепей и цепей управления, блокировки и сигнализации транспортной установки элеватора, управляемой одной пусковой кнопкой.

Нормально открытые блок-контакты K'_1 и K'_2 используются для блокировки, обеспечивающей поочередное включение главных контактов K_1, K_2, K_3 , а блок-контакты K'_3 служат для шунтирования пусковой кнопки Π .

Последовательно с нормально открытыми блок-контактами K'_1 и K'_2 вводятся нормально открытые блок-контакты центробежных реле $РЦ_1$ и $РЦ_2$, размыкающиеся при обрыве или соскальзывании ленты на транспортных машинах.

В лабораторной схеме вместо центробежных реле поставлены реле времени, создающие определенную выдержку времени при включении магнитных пускателей $\Pi М_1, \Pi М_2$ и $\Pi М_3$.

Красные сигнальные лампы $КЛ_1, КЛ_2, КЛ_3$, присоединенные параллельно к катушкам пускателей K_1, K_2, K_3 , загораются при замыкании главных контактов и сигнализируют на мнемонической схеме о работе соответствующих транспортных машин.

Все зеленые $ЗЛ_1, ЗЛ_2, ЗЛ_3$ и красные $КЛ_1, КЛ_2, КЛ_3$ сигнальные лампы находятся на светящемся щите мнемонической схемы.

Пусковая кнопка Π служит для включения, а остановочная O для остановки всей установки.

Каждое деблокирующее устройство d_1, d_2, d_3 состоит из двух пар штепсельных гнезд, замыкаемых одной короткозамкнутой вилкой. При автоматическом пуске транспортной установки все вилки должны быть поставлены в левые пары штепсельных гнезд.

Если же все вилки, кроме одной, поставить в правые гнезда, то при нажатии пусковой кнопки Π в движение придет только один электродвигатель, а прочие будут неподвижны. Такой индивидуальный пропуск транспортных машин производится в тех случаях, когда всю установку пускать в ход нежелательно.

Аварийные выключатели A_1, A_2, A_3 , находящиеся непосредственно у исполнительных механизмов, могут «запретить» пуск данного и всех установленных электродвигателей благодаря применной блокировке.

Электрический секундомер t , начинающий работать при нажатии пусковой кнопки Π и останавливающийся при замыкании главных контактов K_3 , позволяет определить время пуска всей установки в ход.

Проведение опыта

1. Ознакомиться со всей установленной аппаратурой и найти ее графическое изображение на схеме установки.

2. Зарисовать конструкцию светящегося сигнального щита с мнемонической схемой транспортной установки элеватора.

3. Поставить вилки деблокирующих устройств d_1, d_2, d_3 в положение, отвечающее автоматическому централизованному пуску.

4. Включить трехполюсный рубильник P и записать, каким цветом осветятся отдельные части сигнализационного щита.

5. Настроить реле времени на определенную выдержку времени, нажать пусковую кнопку Π , проследить за порядком включения отдельных электродвигателей и записать, какие при этом сигнальные лампы будут гаснуть и какие загораться. Записать время, определяемое по электрическому секундомеру, прошедшее от момента нажатия пусковой кнопки Π до момента включения последнего магнитного пускателя ΠM_3 , и сравнить его с выдержками времени, установленными по шкалам реле времени.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Установленные выдержки времени сек.		Время по электрическому секундомеру t , сек.
	Реле № 1 t_1	Реле № 2 t_2	
1			
2			

6. Нажать остановочную кнопку C , проследить за процессом выключения электродвигателей и записать, какие изменения произойдут при этом в цепях сигнализации.

7. Нажать на кнопку P , включить установку и поочередным выключением различных аварийных выключателей A_1, A_2, A_3 проверить действие блокировки.

Примечание. При правильно действующей блокировке выключение любого аварийного выключателя должно вызвать остановку всех электродвигателей, а при последующем нажатии пусковой кнопки должны включаться все исполнительные механизмы, расположенные после того участка, на котором произошла авария.

8. Установить вилки деблокирующих устройств d_1, d_2, d_3 в соответствующие положения для индивидуального пропуска каждого двигателя, включить установку при трех различных положениях штепсельных вилок и записать, каким цветом будет освещаться каждый раз щит с мнемонической схемой установки элеватора.

9. Определить время выбега каждого электродвигателя и результаты наблюдений записать в виде таблицы.

№ опытов	Наименование электродвигателя	Время выбега t , сек.
1	Надсилосного транспортера	
2	Нории	
3	Подсилосного транспортера	

10. Составить перечень всей аппаратуры данной установки с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Привести эскизы магнитных пускателей, реле времени и сигнального щита.

2. Описать работу отдельных элементов схемы при автоматическом централизованном пуске установки.

3. Объяснить расхождение между временем, отмеченным электрическим секундомером, потребным на пуск установки, и суммой уставок времен по шкалам реле времени №1 и №2.

4. Указать, в каком из одинаковых электродвигателей D_1, D_2, D_3 будут наименьшие механические потери.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 333—338, 342—345.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 709—712, 755—764.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 56—57, 118—126, 130—133, 138—144, 153—157.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 467—478.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ СИГНАЛИЗАЦИОННОЙ СХЕМЫ С ПОДАЧЕЙ ОБРАТНОГО СИГНАЛА

Цель работы

1. Ознакомиться с работой сигнализационной установки и схемой подачи обратного сигнала.
2. Изучить устройство отдельных элементов сигнализационной установки.

Основные теоретические положения

Ведение различных производственных процессов значительно облегчается и упрощается при наличии надежно действующей сигнализационной установки.

При производственной сигнализации в большинстве случаев передаваемые сигналы носят распорядительный характер и дают непосредственное указание лицу, их принимающему, требуя выполнения каких-либо действий или запрещая их.

В особо ответственных случаях применяют контрольные сигналы.

Последние подаются обслуживающим персоналом с рабочих мест и подтверждают диспетчеру правильность принятых сигналов.

Для того чтобы привлечь внимание обслуживающего персонала, находящегося у производственных механизмов к принятию распоряжений, в производственных цехах устанавливаются различного рода акустические сигнальные приборы в виде звонков, гудков, сирен и т. п.

Акустический сигнал, принимаемый на слух, обладает большим психотехническим эффектом, однако он быстро исчезает и не дает возможности осуществить его проверку.

Поэтому акустическая часть сигнализационной установки часто дополняется оптическими приборами.

В этом случае акустический сигнал только привлекает внимание обслуживающего персонала, а сама передача распоряжений осуществляется посредством оптических указателей.

Последние часто оформляются в виде светящихся щитов, которые имеют световое поле с распорядительными надписями («включить», «выключить», «открыть задвижку», «закрыть задвижку» и т. п.), освещаемыми специальными лампами.

Подача распорядительных сигналов производится из диспетчерской в производственные цехи, а контрольных — в обратном направлении при помощи специальных переключателей.

Описание схемы установки

Сигнализационная установка питается от сети однофазного переменного тока $a-b$.

Непосредственно у исполнительного механизма, например вентилятора, устанавливается светящийся щит с сигнальными лампами $ЛС$, дребезжащий звонок переменного тока $З$, включенный через понижающий трансформатор $Тр$ и переключатели $П'_0$, $П'_1$, $П'_2$.

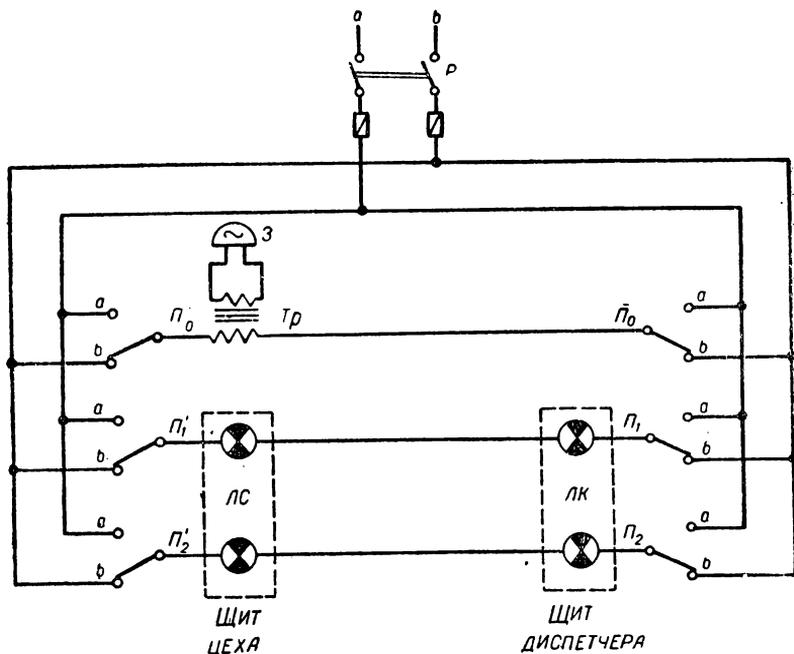


Рис. 164. Электрическая схема сигнализационной установки.

Переключатель $П'_0$ служит для выключения акустического сигнала $З$, а переключатели $П'_1$ и $П'_2$ — для выключения контрольных ламп $ЛК$, установленных в аналогичном светящемся щите диспетчера, которые затуханием подтверждают выполнение данных распоряжений.

Подача диспетчером акустического сигнала в цех осуществляется включением переключателя $П_0$, передача распоряжений — замыканием переключателя $П_1$ («включить») или $П_2$ («выключить»).

Проведение опыта

1. Ознакомиться со всеми элементами сигнализационной установки и собрать ее схему.

2. После проверки собранной схемы руководителем приступить к работе на сигнализационной установке.

Для этого из диспетчерской переключателем P_0 подать акустический, а затем переключателем P_1 оптический сигнал к рабочему месту с требованием пуска агрегата.

3. Убедившись в правильности подачи сигналов к исполнительному механизму, ждать ответного сигнала с рабочего места о выполнении переданного распоряжения.

4. На рабочем месте, получив распоряжение от диспетчера, переключателем P'_0 выключить акустический сигнал Z , а затем, после выполнения распоряжения, переключателем P_1 подать сигнал диспетчеру о выполнении его распоряжения.

5. Далее диспетчеру подать сигнал о необходимости выключения агрегата, а обслуживающему персоналу выполнить необходимые манипуляции в присутствии руководителя занятий.

6. Составить перечень всей аппаратуры сигнализационной установки с приведением ее технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Дать подробное описание принципа действия сигнализационной установки с подачей обратного сигнала.

2. Вычертить схему устройства дребезжащего звонка переменного тока.

3. Составить эскиз светящегося щита с сигнальными лампами.

Литература

Гаврилов Н. П., Гринбаум Я. А., Покровский Г. И., Потапов И. И., Скворцов Б. И., Электрическая тревожная и производственная сигнализация, ч. I, ОНТИ, 1935, стр. 11—19, 218—234.

Работа № 47

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЧЕТЧИКА ШТУЧНЫХ ГРУЗОВ

Цель работы

1. Ознакомиться с принципом действия установки автоматического счетчика штучных грузов.

2. Изучить схемы фотореле на постоянном и переменном токе.

3. Исследовать фотоэлектрический счетчик штучных грузов и установить предельную частоту световых импульсов, отвечающую нормальной работе счетчика.

Основные теоретические положения

На многих предприятиях приходится вести счет штучных грузов, движущихся по ленте транспортера (мешки с мукой, консервные банки, ящики с разнообразной готовой продукцией и т. п.).

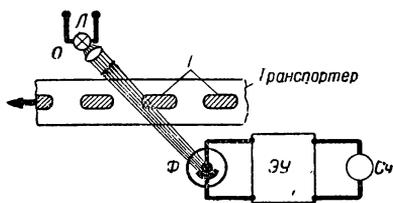


Рис. 165. Принципиальная схема установки для автоматического счета штучных грузов.

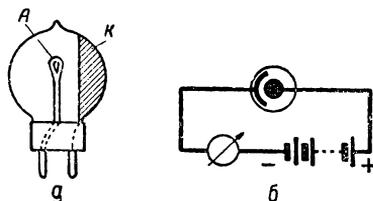


Рис. 166. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом: а — общий вид, б — схема его включения.

Выполнение этой задачи может быть автоматизировано при помощи фотореле, представляющего собой объединение фотоэлемента, электронной лампы и электромагнитного счетчика.

На рис. 165 приведена принципиальная схема установки для автоматического счета штучных грузов, движущихся по ленте транспортера.

Световой луч, идущий от осветителя O , периодически прерывается движущимися грузами $Г$ и падает на фотоэлемент $Ф$, который подключен к электронному усилителю $ЭУ$, работающему на электромагнитный счетчик $Сч$ числа движущихся объектов.

В данной установке датчиком является фотоэлемент с внешним фотоэффектом, представляющим собой пустотный или газонаполненный прибор с сурьмяно-цезиевым катодом (рис. 166).

При освещении последнего с его поверхности вылетают свободные электроны, которые направляются к положительно заряженному аноду, выполненному в виде небольшого проволочного кольца, помещенного в центре колбы фотоэлемента.

Так как возникающий фототок мал, то фотоэлемент приходится соединять с электронным усилителем, нагрузкой для которого служит катушка P электромагнитного счетчика штучных грузов (рис. 167).

В этой схеме начальное отрицательное напряжение на управляющую сетку электронной лампы $Л$ задается делителем напряжения $Д$ таким, чтобы при затемненном фотоэлементе $Ф$ анодный ток I_a был бы равен или близок к нулю (лампа заперта).

При освещении фотоэлемента и возникновении фототока I_{ϕ} на сопротивлении смещения r_c произойдет падение напряжения $\Delta U_c = I_{\phi} r_c$, которое оторвет лампу и через нее потечет рабочий ток I_a , величина которого определяется анодным напряжением U , параметрами лампы и катушки электромагнитного счетчика, находящейся в анодной цепи. При этом счетный механизм счетчика сработает на одно деление, отвечающее грузу, прошедшему на транспортере.

При закрытии источника света следующим движущимся объектом фототок прекратится, лампа загорится и механизм электромагнитного счетчика вернется в исходное положение.

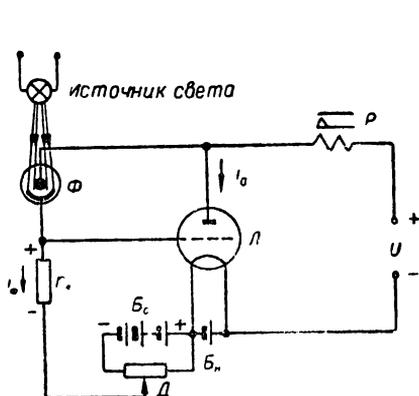


Рис. 167. Схема фотореле на постоянном токе.

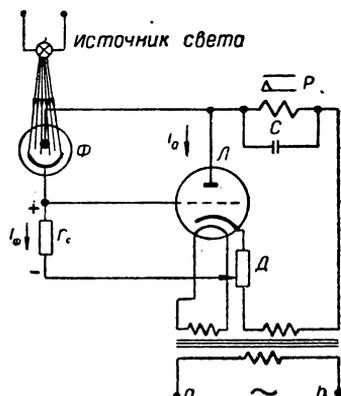


Рис. 168. Схема фотореле на переменном токе.

Недостатком описанной схемы является потребность в наличии источника постоянного тока.

Схема, приведенная на рис. 168, не имеет этого недостатка, так как источником ее питания может служить обычная сеть переменного тока.

Электронная лампа с подогревным катодом является одновременно и выпрямителем переменного тока.

Так как анодный ток в этом случае является пульсирующим, то для предотвращения дрожания контактов параллельно обмотке счетчика P подключается конденсатор C .

Описание схемы установки

Установка состоит из следующих частей: фотореле, собранного по схеме рис. 168, с электромагнитным счетчиком C_4 ; источника света — лампы накаливания L и оптической системы O ; прерывателя светового потока Π , падающего на фотоэлемент Φ ; электродвигателя постоянного тока D , приводящего во вращение че-

рез замедляющую зубчатую передачу прерыватель P ; пускорегулировочного реостата r_n для пуска и регулирования скорости вращения электродвигателя D ; выпрямителя B ; счетчика числа световых импульсов Z ; трансформаторов Tr_1 и Tr_2 .

Проведение опыта

1. Собрать схему установки и подготовить ее к пуску, для чего полностью ввести пускорегулировочный реостат r_n .

2. После проверки схемы руководителем включить двухполюсный рубильник и, спустя 30—50 сек., когда разогреется катод электронной лампы, а счетчик начнет реагировать на световые импульсы, приступить к производству опыта.

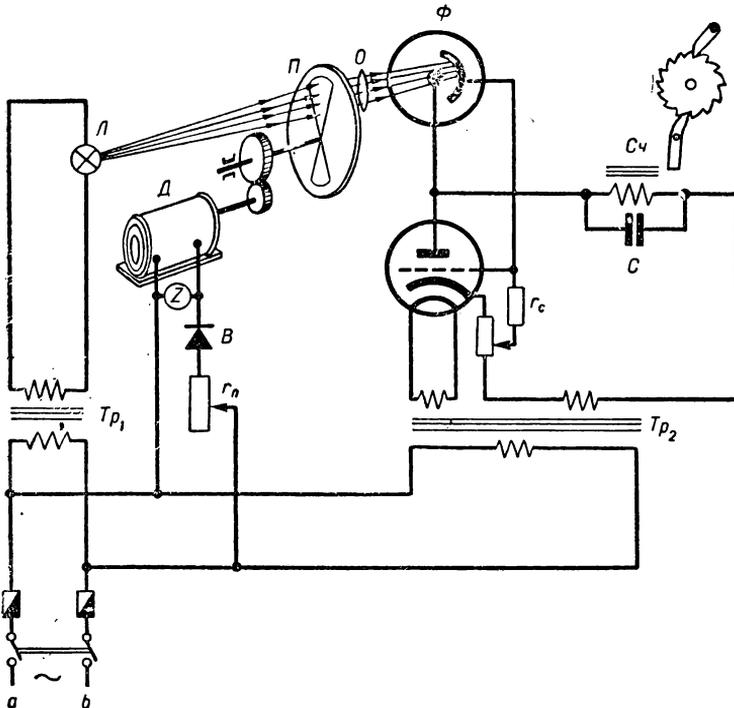


Рис. 169. Схема исследования фотоэлектрического счетчика.

3. Установить наименьшую скорость вращения электродвигателя, закрыть луч света, падающий на фотоэлемент, установить стрелку электромагнитного счетчика в нулевое положение и после этого, открыв фотоэлемент, пустить в ход секундомер. Через некоторое время снова закрыть фотоэлемент и одновременно с этим остановить секундомер, произведя соответствующие отсчеты по измерительным приборам.

4. Повышать число световых импульсов в минуту и для каждого установленного режима выполнять опыт, описанный в пункте третьем. Увеличение вести до тех пор, пока электромагнитный счетчик не в состоянии будет следовать за количеством световых импульсов в минуту.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Время t , сек.	Число световых импульсов в минуту z	Показание электромагнитного счетчика
1			
2			
3			
4			
5			

Обработка результатов испытания

1. Для всех проведенных опытов определить погрешность показаний электромагнитного счетчика, считая образцово определенными число световых импульсов в минуту и время.

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Число срабатываний фотореле	Показание электромагнитного счетчика	Погрешность, %
1			
2			
3			
4			
5			
6			

2. Записать предельное количество световых импульсов в минуту, которое безошибочно регистрируется фотоэлектрическим счетчиком штучных грузов.

3. Указать, какой прибор в исследуемой схеме первый нарушает правильность ее работы при увеличении числа световых импульсов в минуту.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 293—298, 310—323.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 623—632.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 486—489, 508—511.

Шляндин В. М., Элементы автоматики и телемеханики, Оборонгиз, 1954, стр. 109—121.

РАЗДЕЛ 11

ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ И КОМПЕНСАЦИЯ СДВИГА ФАЗ

Работа № 48

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПониЗИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Цель работы

1. Изучить схему и аппаратуру понизительной трансформаторной подстанции трехфазного тока.
2. Определить активную и реактивную мощности, а также коэффициент мощности по счетчикам электрической энергии, установленным на подстанции.
3. Установить распределение нагрузок между параллельно включенными трансформаторами.
4. Подсчитать стоимость потребляемой электроэнергии предприятием по двухставочному тарифу с учетом значения средневзвешенного коэффициента мощности.

Основные теоретические положения

Электроснабжение промышленных предприятий производится, в большинстве случаев, от центральных электрических станций при напряжении 6,10 или 35 кВ при частоте 50 Гц.

Так как это напряжение для электроприемников, устанавливаемых непосредственно в производственных цехах, является сравнительно высоким, то на территории предприятия сооружаются трансформаторные понизительные подстанции, понижающие подводимое напряжение до меньшего значения.

Величина последнего определяется номинальным значением напряжения электроприемников, которое для различных потребителей бывает 500 или 380/220 в.

Обычно в заводских условиях на трансформаторной подстанции бывает не более двух-трех трансформаторов одинаковых или различных мощностей, работающих на общие шины.

Анализируя график работы любого предприятия, можно установить, что бывают и такие периоды, когда совместная работа всех трансформаторов не требуется и вся нагрузка может быть воспринята частью или даже одним трансформатором.

В таких случаях рационально для уменьшения потерь электрической энергии с одновременным повышением коэффициента мощности один из трансформаторов, находящийся в параллельной работе, отключить от шин вторичного, а затем и первичного напряжения и этим самым перевести всю нагрузку на оставшиеся в работе трансформаторы.

Последние, в этом случае, как получившие дополнительную нагрузку, будут работать с более высокими электрическими показателями, т. е. с повышенными значениями k , p , d и $\cos \varphi$.

В дальнейшем, если нагрузка вновь начнет возрастать и какой-либо из параллельно работающих трансформаторов будет перегружаться, то прежде чем включать отключенный трансформатор снова на параллельную работу, следует установить величину перегрузки и оценить тепловое состояние перегружаемого трансформатора.

Если до этого трансформатор работал с некоторой недогрузкой и, следовательно, был недогрет до нормы, то его можно некоторое время эксплуатировать с такой перегрузкой, чтобы не вызвать дополнительного износа изоляции его обмоток из-за возможного перегрева.

Величина этой так называемой нормальной перегрузки и ее продолжительность в каждом отдельном случае устанавливается особо и зависит от графика нагрузки трансформатора, температуры охлаждающей среды и состояния изоляции его обмоток.

Предельное значение повышения мощности для трансформаторов на закрытых подстанциях допускается до 20% и для установок открытого типа — до 30% от их номинальной мощности.

Наряду с такими нормальными перегрузками в отдельных случаях приходится допускать значительно большие нагрузки, которые вызывают дополнительный износ изоляции и могут рассматриваться как аварийные.

Эти перегрузки разрешается допускать только в крайнем случае.

Величины их определяются данными, приведенными в табл. 5.

В обычных условиях, если величина устанавливаемой нагрузки, определяемой по показаниям электроизмерительных приборов, превышает допустимую нормальную перегрузку трансфор-

Таблица 5

Нагрузка трансформатора в долях от номинальной	Допустимая продолжительность работы трансформатора	
1,3	2 час.	
1,6	30 мин.	
1,75	15 "	
2,0	7,5 "	
2,4	3,5 "	
3,0	1,5 "	

матора, следует в помощь ему подключить другой трансформатор на параллельную работу.

Для того чтобы в дальнейшем нагрузка между параллельно включенными трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, необходимо соблюдать равенства их коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания, а также принадлежность к одной и той же группе соединений и обмоток.

Контроль за распределением нагрузки между параллельно работающими трансформаторами осуществляется по показаниям амперметров, измеряющих ток трансформаторов.

Этими же показаниями следует руководствоваться и при производстве необходимых, с точки зрения рациональной эксплуатации, переключений.

Измерение израсходованной электрической энергии за определенный промежуток времени производится на трансформаторных подстанциях со стороны первичного напряжения, где устанавливаются счетчики активной и реактивной энергии, которые включаются через соответствующие измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Величины израсходованной активной W_a и реактивной W_p энергий находятся как разности конечных и начальных отсчетов по соответствующим счетчикам, умноженные на коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов, т. е.

$$W_a = (W_a'' - W_a') k_n k_T \quad (1)$$

и

$$W_p = (W_p'' - W_p') k_n k_T, \quad (2)$$

где W'_a и W''_a — начальное и конечное показание счетчика активной энергии;
 W'_p и W''_p — начальное и конечное показание счетчика реактивной энергии;
 κ_n и κ_t — коэффициенты трансформации соответственно измерительных трансформаторов напряжения и тока.

Средневзвешенный коэффициент мощности на подстанции находится из соотношения

$$\cos \varphi_{\text{срвзв}} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}. \quad (3)$$

Наличие на трансформаторной подстанции счетчиков активной и реактивной энергий позволяет, в случае необходимости, определить потребляемые предприятием активную P и реактивную Q мощности, а также значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ в момент измерения.

Для этого в течение небольшого промежутка времени, порядка 30—60 сек., *одновременно* по обоим счетчикам определяют длительность целых чисел оборотов дисков, а затем подсчитывают указанные выше величины следующим образом:

$$P = \frac{3600 N_a}{n_a t_a} \cdot \kappa_n \kappa_t, \quad (4)$$

$$Q = \frac{3600 N_p}{n_p t_p} \cdot \kappa_n \kappa_t, \quad (5)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (6)$$

где N_a и N_p — целые числа оборотов дисков соответственно счетчиков активной и реактивной энергий;

n_a и n_p — числа оборотов дисков счетчиков, отвечающих соответственно 1 *квт-ч* и 1 *квар-ч*;

t_a и t_p — время, отвечающее целым числам оборотов дисков счетчиков соответственно N_a и N_p ;

κ_n и κ_t — коэффициенты трансформации соответственно измерительных трансформаторов напряжения и тока.

Стоимость потребленной электроэнергии для промышленных предприятий с присоединенной мощностью 50 *ква* и выше определяется по двухставочному тарифу.

Последний предусматривает оплату за присоединенную мощность в *ква* со стороны первичного напряжения (основная плата), за израсходованную электроэнергию в *квт-ч* (дополнительная плата), а также начисление скидки или надбавки к основной и дополнительной плате за величину средневзвешенного коэффициента мощности.

В соответствии с этим стоимость электроэнергии по двухставочному тарифу удобно определять по формуле

$$s_0 = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \left(\frac{g}{12} S + d W_a 10^{-2}\right), \quad (7)$$

- где s_0 — стоимость потребленной электроэнергии, руб/мес;
 α — размер скидки или надбавки, процент;
 g — стоимость оплаты за 1 *ква* присоединенной мощности трансформаторов и электродвигателей со стороны первичного напряжения, руб/год·*ква*;
 S — присоединенная мощность электрооборудования со стороны первичного напряжения, *ква*;
 d — стоимость 1 *квт-ч* отпущенной электроэнергии, коп/квт-ч;
 W_a — потребленная электроэнергия, *квт-ч/мес*.

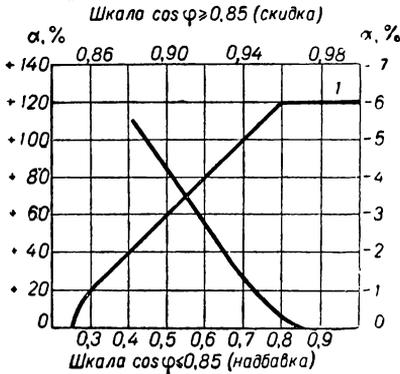


Рис. 170. Зависимость скидки (—) или надбавки (+) к основной и дополнительной плате за электроэнергию от коэффициента мощности предприятия:
 1 — кривая скидки, 2 — кривая надбавки.

Величины g и d определяют по специальной таблице тарифов на отпуск электроэнергии (см. стр. 77).

Величина α берется из таблицы шкалы скидок и надбавок за коэффициент мощности или определяется по кривой, представленной на рис. 170.

Фактическая стоимость 1 *квт-ч* (в копейках) для предприятия, оплачивающего электроэнергию по двухставочному тарифу, будет

$$d_0 = \frac{s_0 10^2}{W_a}. \quad (8)$$

Описание схемы установки

Установка, на которой производится экспериментирование (рис. 171), представляет собой небольшую трансформаторную подстанцию с двумя трансформаторами трехфазного тока Tr' и Tr'' .

Электрическая энергия повышенного напряжения подводится кабелем трехфазного тока к шинам A, B, C , откуда через плавкие предохранители главный магнитный пускатель PM и поступает к магнитным пускателям PM' и PM'' трансформаторов Tr' и Tr'' .

На стороне высшего напряжения установлены: вольтметр V_1 с вольтметровым переключателем $ВП_1$ для измерения трех линейных напряжений U_{12}, U_{23}, U_{31} ; три амперметра A , указы-

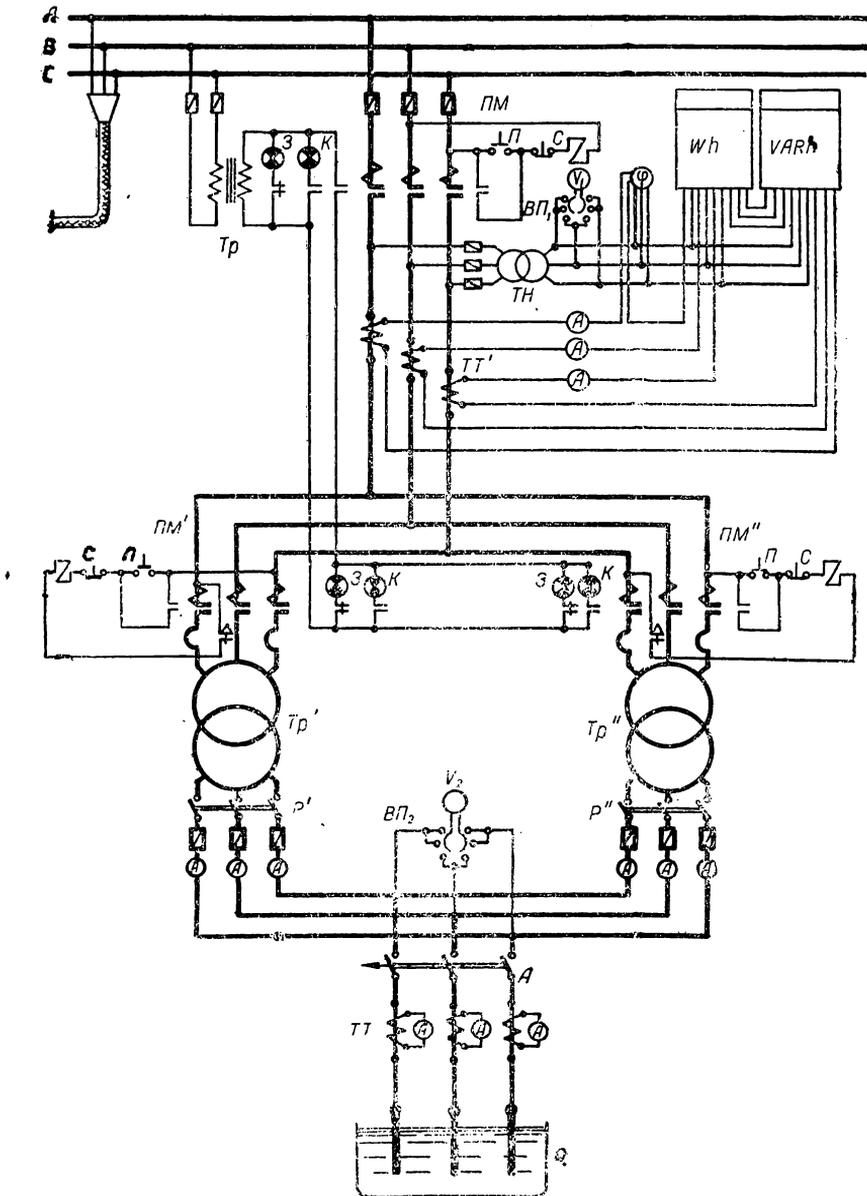


Рис. 171. Трехлинейная схема трансформаторной подстанции.

вающие линейные токи I_1, I_2, I_3 ; фазометр трехфазного тока φ , измеряющий коэффициент мощности $\cos \varphi$ и счетчики активной Wh и реактивной $VARh$ энергии, которые учитывают электрическую энергию, прошедшую через данную трансформаторную подстанцию.

Все электроизмерительные приборы включены через измерительный трансформатор напряжения $TН$ и измерительные трансформаторы тока $ТТ'$.

Трансформаторы Tr' и Tr'' включены со стороны первичного напряжения через магнитные пускатели $ПМ'$ и $ПМ''$.

Со стороны вторичного напряжения каждого трансформатора имеются трехполюсные рубильники P' и P'' , плавкие предохранители, а также амперметры, измеряющие нагрузку каждой фазы трансформаторов.

Напряжение измеряется вольтметром V_2 с вольтметровым переключателем $ВП_2$, что дает возможность определить величины u_{12}, u_{23}, u_{31} .

На линии, отходящей от шин вторичного напряжения установлен трехполюсный автомат A с максимальной токовой защитой и три амперметра, включенные через измерительные трансформаторы тока $ТТ$.

Нагрузка осуществляется при помощи жидкостного реостата r .

Управление магнитными пускателями $ПМ, ПМ', ПМ''$ производится при помощи двухкнопочных станций с кнопками $П$ и $С$.

Зеленые $З$ и красные $К$ сигнальные лампы включаются и выключаются нормально закрытыми и нормально открытыми блок-контактами магнитных пускателей, а питание их осуществляется от шин подстанции через понижающий трансформатор Tr .

Защита минимального напряжения производится катушками магнитных пускателей, а максимальная токовая — плавкими предохранителями и тепловыми реле.

Проведение опыта

1. Ознакомиться на смонтированной установке со всей установленной аппаратурой и найти ее графическое изображение на принципиальной схеме трансформаторной подстанции.

2. Выключить трехполюсный автомат A и трехполюсные рубильники P' и P'' , установить ножи нагрузочного жидкостного реостата r в верхнее положение, а затем подать напряжение на шины подстанции A, B, C и записать, какая сигнальная лампа загорится.

3. Нажать пусковую кнопку $П$ главного магнитного пускателя $ПМ$ и записать, какие изменения произойдут с сигнальными лампами.

4. При помощи вольтметра V_1 с вольтметровым переключателем $ВП_1$ измерить три линейные напряжения со стороны первичного напряжения подстанции и записать начальные показания счетчиков, сведя результаты наблюдений в таблицу.

№ опытов	Линейные напряжения, в			Начальные показания счетчиков	
	U_{12}	U_{23}	U_{31}	активной энергии W'_a , квт-ч	реактивной энергии W'_p , квар-ч
1					

5. Нажать на пусковую кнопку магнитного пускателя $ПМ'$ трансформатора Tr' и отметить, какие из сигнальных ламп при этом погаснут и какие загорятся.

6. Записать показания всех приборов с первичной стороны подстанции и при помощи секундомеров определить время произвольного целого числа оборотов дисков обоих счетчиков.

7. Замкнуть трехполюсный рубильник P' и измерить со стороны вторичного напряжения подстанции три линейные напряжения при помощи вольтметра V_2 с вольтметровым переключателем $ВП_2$.

8. Замкнуть трехполюсный автоматический выключатель A и установить равномерную нагрузку фаз трансформатора Tr' в 25, 50, 75, 100, 125% номинального вторичного тока.

Для каждого режима записать показание всех стрелочных приборов и определить время, отвечающее произвольным целым числам оборотов дисков счетчиков активной и реактивной энергий.

Результаты наблюдений свести в две таблицы.

Результаты измерений со стороны первичного напряжения подстанции

№ опытов	$U_{12}, в$	$U_{23}, в$	$U_{31}, в$	$I_1, а$	$I_2, а$	$I_3, а$	$\cos\varphi$	N_a , обор.	t_a , сек.	N_p , обор.	t_p , сек.	Нагрузка трансформатора T' , процент
1												0
2												~ 25
3												~ 50
4												~ 75
5												~ 100
6												~ 125

Результаты измерений со стороны вторичного напряжения подстанции

№ опытов	$U_{12}, \text{в}$	$U_{23}, \text{в}$	$U_{31}, \text{в}$	$i'_1, \text{а}$	$i'_2, \text{а}$	$i'_3, \text{а}$	Нагрузка трансформатора T' , процент
1				0	0	0	0
2							~ 25
3							~ 50
4							~ 75
5							~ 100
6							~ 125

9. Включить трансформатор T'' только со стороны первичного напряжения и повторить опыты восьмого пункта с трансформатором T' .

Результаты наблюдений записать в аналогичные таблицы.

10. Замыканием трехполюсного рубильника P'' включить трансформаторы T' и T'' на параллельную работу, затем произвести наблюдения по приборам для разных нагрузок и результаты опытов свести в таблицы.

Результаты измерений со стороны первичного напряжения подстанции

№ опытов	$U_{12}, \text{в}$	$U_{23}, \text{в}$	$U_{31}, \text{в}$	$I_1, \text{а}$	$I_2, \text{а}$	$I_3, \text{а}$	$\cos \varphi$	$N_a, \text{обор.}$	$t_a, \text{сек.}$	$N_p, \text{обор.}$	$t_p, \text{сек.}$	Нагрузка трансформаторов T' и T'' , процент
1												0
2												~ 25
3												~ 50
4												~ 75
5												~ 100
6												~ 125

Результаты измерений со стороны вторичного напряжения подстанции

№ опытов	$U_{12}, \text{в}$	$U_{23}, \text{в}$	$U_{31}, \text{в}$	$i'_1, \text{а}$	$i'_2, \text{а}$	$i'_3, \text{а}$	$i''_1, \text{а}$	$i''_2, \text{а}$	$i''_3, \text{а}$	$i_1, \text{а}$	$i_2, \text{а}$	$i_3, \text{а}$	Нагрузка трансформаторов T' и T'' , процент
1				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2													~ 25
3													~ 50
4													~ 75
5													~ 100
6													~ 125

11. Записать конечные показания счетчиков в таблицу.

№ опытов	Конечные показания счетчиков	
	активной энергии W_a^* , квт-ч	реактивной энергии W_p^* , квар-ч
1		

12. Переписать паспорта трансформаторов и составить перечень всего оборудования подстанции с приведением его технических данных.

Обработка результатов испытания

1. Описать работу той части схемы подстанции, которая обслуживает сигнальные лампы, установленные у магнитных пускателей.

2. Рассчитать для всех режимов работы трансформаторов активную и реактивную мощности, потребляемые подстанцией, а также ее коэффициент мощности.

Результаты расчетов свести в таблицы:

а) работа одного трансформатора под нагрузкой

№ опытов	Со стороны первичного напряжения					Со стороны вторичного напряжения		Нагрузка, процент	
	$U, в$	$I, а$	$\cos\varphi$ по фазомеру	$P, ват$	$Q, квар$	$\cos\varphi$ по счетчикам	$u, в$		$i, а$
1								0	0
2									~ 25
3									~ 50
4									~ 75
5									~ 100
6									~ 125

б) работа одного трансформатора под нагрузкой, а другого — в режиме холостого хода:

№ опытов	Со стороны первичного напряжения						Со стороны вторичного напряжения		Нагрузка, процент
	$U, в$	$I, а$	cosφ по фазометру	$P, кет$	$Q, квар$	cosφ по счетчикам	$u, в$	$i, а$	
1									0
2									~ 25
3									~ 50
4									~ 75
5									~ 100
6									~ 125

в) параллельная работа двух трансформаторов.

№ опытов	Со стороны первичного напряжения						Со стороны вторичного напряжения				Нагрузка, процент
	$U, в$	$I, а$	cosφ по фазометру	$P, кет$	$Q, квар$	cosφ по счетчикам	$u, в$	$i', а$	$i'', а$	$i, а$	
1								0	0	0	0
2											~ 25
3											~ 50
4											~ 75
5											~ 100
6											~ 125

3. Построить графики зависимости вторичного напряжения u , вторичных токов трансформаторов i' и i'' , коэффициента

мощности подстанции $\cos \varphi$ от тока нагрузки i для следующих случаев:

а) включен только трансформатор T' с первичной и вторичной стороны —

$$u = f(i); i' = f(i); \cos \varphi = f(i);$$

б) то же, но со стороны первичного напряжения подключен еще трансформатор T'' —

$$u = f(i); i' = f(i); \cos \varphi = f(i);$$

в) оба трансформатора T' и T'' включены на параллельную работу —

$$u = f(i); i' = f(i); i'' = f(i); \cos \varphi = f(i).$$

При построении необходимо графики типов $u = f(i)$ и $\cos \varphi = f(i)$ для всех случаев нагрузки дать в одной координатной системе, а все остальные — в другой.

Анализируя составленные графики, дать заключение о влиянии холостого хода трансформатора T'' на коэффициент мощности подстанции, а также определить ток нагрузки, при котором трансформаторная подстанция работает с одинаковым коэффициентом мощности при одном и двух параллельно включенных трансформаторах.

4. Найти средневзвешенный коэффициент мощности.

5. Считая, что трансформаторная подстанция работает непрерывно в течение месяца при средней нагрузке 75% от номинальной, определить фактическую стоимость 1 квт-ч электроэнергии, отпущенной потребителю заданной энергосистемой, если за 1 квт взимается g руб. в год, за 1 квт-ч, учтенный со стороны первичного напряжения, дополнительно d коп. и делается скидка или надбавка к основной и дополнительной плате в соответствии с действующей шкалой скидок и надбавок в зависимости от значения средневзвешенного коэффициента мощности.

Примечание. Расчет проделать по двухставочному тарифу, несмотря на то, что мощность трансформаторной подстанции может быть меньше 50 квт.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 187—188, 192—197, 358—359.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 360—366, 368—382, 766—778, 320—325.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 342—343, 345—348, 597—599.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, ГТИ УССР, 1956, стр. 234—238, 278—281, 300—303.

Работа № 49

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ЗАВОДСКОЙ УСТАНОВКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ

Цель работы

1. Составить трехлинейную схему установки с натуры.
2. Определить коэффициенты мощности различных электроприемников и всего предприятия в целом.
3. Найти по опытным данным величину компенсирующей емкости конденсаторной батареи.
4. Определить установленную мощность установки и величину коэффициента спроса.
5. Подсчитать потребляемую мощность трансформаторной подстанции и фактическую стоимость 1 *квт-ч* отпущенной электроэнергии в зависимости от отсутствия или наличия компенсирующего устройства.

Основные теоретические положения

Значение коэффициента мощности промышленного предприятия $\cos \varphi$ зависит от величины реактивной мощности, потребляемой различными электроприемниками.

Основными потребителями реактивной мощности являются асинхронные электродвигатели, коэффициент мощности которых зависит от их загрузки и имеет значение от $\cos \varphi_0 = 0,1—0,25$ до $\cos \varphi_n = 0,70—0,93$ в зависимости от конструктивных особенностей машины.

Асинхронные электродвигатели потребляют около 65—70% всей реактивной мощности предприятия.

Трансформаторы, работающие также с переменным коэффициентом мощности, потребляют около 15—25% реактивной мощности и около 5—10% всей реактивной мощности забирают воздушные электрические сети, сварочные агрегаты и т. д.

Синхронные электродвигатели могут при неизменной нагрузке на валу работать с различным $\cos \varphi$ в зависимости от тока возбуждения и вести себя аналогично активной, индуктивной или емкостной нагрузке.

Светотехнические установки с лампами накаливания работают при $\cos \varphi = 1$, а люминесцентные лампы, укомплектованные дросселями, составляющими, непременную часть установки, с $\cos \varphi < 1$.

Компенсирующие устройства, представляющие собой конденсаторные батареи, работают с $\cos \varphi \cong 0$ при $\varphi \cong -90^\circ$, так как

потери активной электроэнергии в них составляют всего 0,003 — 0,005 *квт/квв*.

Экспериментальное определение коэффициентов мощности отдельных электроприемников $\cos \varphi_i$, а также всего предприятия в целом $\cos \varphi_1$ можно провести по методу вольтметра, амперметра, ваттметра или непосредственно фазометром.

Кроме того, общезаводской коэффициент мощности $\cos \varphi_1$, если пренебречь потерями активной энергии в сетях вторичного напряжения, можно найти из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^{i=n} I_i \cos \varphi_i}, \quad (1)$$

где I_i — ток i -ого электроприемника;

$\cos \varphi_i$ — его коэффициент мощности;

n — число параллельно соединенных электроприемников.

Наличие присоединенной конденсаторной батареи реактивной мощностью Q_k , которой отвечает фазная емкость при соединении треугольником

$$C = \frac{Q_k \cdot 10^9}{3 U^2 \cdot 2 \pi f} \text{ мкф}, \quad (2)$$

дает возможность довести коэффициент мощности предприятия до значения $\cos \varphi_2$, определяемого из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{P \operatorname{tg} \varphi_1 - Q_k}{P + \Delta P_k}, \quad (3)$$

где P — активная мощность, потребляемая заводом;

ΔP_k — потери активной мощности в компенсирующем устройстве;

φ_1 и φ_2 — углы сдвига фаз между напряжением и током до и после компенсации.

Величина общезаводского коэффициента мощности имеет существенное значение для выбора мощности трансформаторной подстанции, которая

$$S_{т.п} \geq \frac{P_{\max}}{\cos \varphi}, \quad (4)$$

где P_{\max} — наибольшая нагрузка на шинах вторичного напряжения трансформаторной подстанции;

$\cos \varphi$ — средневзвешенное значение коэффициента мощности предприятия.

Величина P_{\max} находится из соотношения

$$P_{\max} = \frac{P'_{\max}}{\eta_c}, \quad (5)$$

где P'_{\max} — наибольшая нагрузка всех цехов, питающихся от данной трансформаторной подстанции;

η_c — к. п. д. электросетей вторичного напряжения (0,92—0,9).

При проектных работах наибольшую, или расчетную, нагрузку на шинах вторичного напряжения трансформаторной подстанции находят из соотношения

$$P_{\max} = \kappa_c P_y, \quad (6)$$

где κ_c — коэффициент спроса со стороны шин вторичного напряжения;

P_y — установленная мощность всех электроприемников.

Последняя находится из соотношения

$$P_y = \sum_{i=1}^{i=n} P_{y_i}, \quad (7)$$

где P_{y_i} — установленная мощность каждого электроприемника,

квт;

n — число электроприемников.

Величина коэффициента мощности определяет собой фактическую стоимость 1 *квт-ч* электроэнергии, отпущенной предприятию,

$$d_0 = \frac{s_0 \cdot 10^2}{W_a}, \quad (8)$$

где s_0 — месячная стоимость израсходованной электроэнергии заводом, руб/мес;

W_a — потребленная им активная электроэнергия, *квт-ч/мес*.

Все предприятия с присоединенной мощностью $S \geq 50$ *кВА* оплачивают электроэнергию по двухставочному тарифу и ее месячная стоимость находится из выражения

$$s_0 = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) \left(\frac{g}{12} \cdot S_{\text{прис}} + d \cdot W_a \cdot 10^{-2}\right), \quad (9)$$

где α — размер скидки или надбавки в зависимости от $\cos \varphi$, проц.;

g — основная плата за 1 *кВА* присоединенной мощности со стороны первичного напряжения, *руб/год·кВА*;

d — стоимость 1 *квт-ч* отпущенной электроэнергии, *коп/квт-ч*;

W_a — месячное потребление активной электроэнергии, *квт-ч/мес*.

Описание схемы установки

Установка (рис. 172) состоит из параллельно включенных через магнитные пускатели *ПМ* асинхронного электродвигателя *Д*, работающего на вентиляторе, трансформатора трехфазного тока *Тр* с небольшой активной нагрузкой со вторичной стороны, трех групп ламп накаливания *Л* и конденсаторов *С*, соединенных треугольником, которые представляют собой компенсирующую установку.

Электроизмерительные приборы позволяют измерять ток каждого электроприемника в отдельности и всей установки в целом.

Наличие киловатт-метра *кВт* и фазометра *Ф* дает возможность измерять потребляемые мощности, а также наблюдать за изменением коэффициента мощности при различных электроприемниках и их комбинациях.

Вольтметр *V* измеряет напряжение, под которым работают все электроприемники.

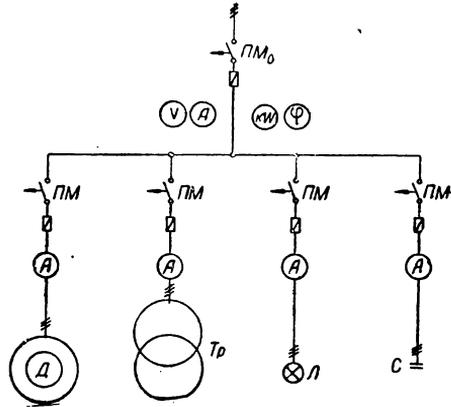


Рис. 172. Однолинейная схема силовых цепей установки.

Проведение опыта

1. Составить электрическую трехлинейную схему соединений, применив условные обозначения машин, аппаратов и приборов.
2. Определить установленную мощность всех трех электроприемников и данные записать в таблицу.

Наименование электроприемника	Установленная мощность P_{y_i} , <i>квт</i>
Асинхронный электродвигатель	
Трансформатор трехфазного тока	
Лампы накаливания	

3. Произвести измерения всех электрических величин при комбинациях, указанных в таблице.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Ток, a					Мощность $P, квт$	Коэффициент мощности	
		общий I	электродви- гателя I_1	трансфор- матора I_2	ламп I_3	конденса- торов I_4		по фазо- метру $\cos \varphi'$	по расчету $\cos \varphi$
1									
2			—	—	—	—			
3			—	—	—	—			
4			—	—	—	—			
5			—	—	—	—			
6			—	—	—	—			
7			—	—	—	—			
8			—	—	—	—			

4. Составить перечень всей использованной аппаратуры с приведением ее технических данных и записать паспорта электродвигателя и трансформатора.

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать для всех произведенных опытов коэффициент мощности $\cos \varphi$ и записать полученные значения в таблицу с результатами наблюдений.

2. Подсчитать величину емкости плеча треугольника конденсаторной батареи.

3. Найти величину установленной мощности всей установки и коэффициент спроса при полной нагрузке.

4. Определить месячную стоимость израсходованной электроэнергии по двухставочному тарифу для шестого и восьмого опытов применительно к энергосистеме, указанной преподавателем, а также фактическую стоимость 1 квт-ч отпущенной электроэнергии.

5. Высказать соображения о влиянии ламповой нагрузки на коэффициент мощности предприятия.

Литература

Касаткин А. С., Перекалкин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 94—96, 221—223, 348.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 211—222, 432, 443—445, 781—782.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 154—166, 402—405.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, Гостехиздат УССР, 1956, стр. 258—283.

РАЗДЕЛ 12

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Работа № 50

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЛЮКСМЕТРА

Цель работы

1. Определить величины светового потока, излучаемого светильниками с лампами накаливания и с люминесцентными лампами.
2. Найти коэффициент полезного действия светильников.
3. Установить зависимость светового потока и световой отдачи различных источников света в зависимости от величины напряжения в питающей их сети.
4. Практически ознакомиться с фотоэлементами и применением их для измерения величины освещенности рабочих поверхностей.

Основные теоретические положения

Чтобы создать благоприятные условия для работы на предприятиях, необходимо обеспечить достаточную по величине и равномерности освещенность на рабочих местах.

При искусственном электрическом освещении это достигается соответствующим размещением светильников, выбором типа светотехнической арматуры и установлением источника света необходимой мощности.

В настоящее время искусственное освещение промышленных предприятий в большинстве случаев осуществляется лампами накаливания и в отдельных случаях люминесцентными лампами.

Нормальные лампы накаливания, применяемые для целей освещения (типы НВ, НГ, НБ), имеют накаливаемую вольфрамовую нить, помещенную в стеклянный баллон.

При небольшой мощности P_n (от 10—15 до 40—60 *вт*) они изготавливаются пустотными, а при больших мощностях (до 1000 *вт*) — газонаполненными на напряжения 127 и 220 *в*.

В зависимости от величины номинальной потребляемой мощности лампы P_n ее накаленная вольфрамовая нить обеспечивает световой поток F_n от 70 до 19 500 *лм* при световой отдаче γ 7—19,5 *лм/вт*, причем величина последней

$$\gamma = \frac{F_n}{P_n} \quad (1)$$

приведена для электрического режима лампы, указанного в ее паспортных данных.

Температура вольфрамовой нити в пустотных лампах около 2100°, а в газонаполненных до 2600°.

Нить может иметь прямолинейную, спиральную или двойную спиральную (биспиральную) форму.

Средний срок службы лампы накаливания при номинальном напряжении равен 1000 часам.

За это время вследствие распыления нити стеклянная колба покрывается внутри темным налетом, световой поток уменьшается приблизительно на 10% от номинального и дальнейшая эксплуатация таких ламп считается нецелесообразной.

К. п. д. современных ламп накаливания невысок, обычно 0,03, и только в самых лучших конструкциях он доходит до 0,06—0,08.

В настоящее время для освещения используют также люминесцентные лампы (типы ДС, ХБС, БС, ТС), которые дают возможность по сравнению с обычными лампами накаливания повысить величину освещенности в 2—2,5 раза и обеспечить высокое качество освещения без увеличения установленной мощности.

Люминесцентные лампы представляют собой трубчатые аргоно-ртутные лампы, внутренняя поверхность колбы которых покрыта люминофором (сернистые соединения меди, магния, цинка, кадмия и др.).

По обоим концам трубки люминесцентной лампы впаяны металлические электроды в виде вольфрамовых биспиралей.

Прохождение электрического тока через аргоно-ртутную смесь сопровождается испусканием невидимых глазом ультрафиолетовых лучей, под влиянием которых начинается свечение люминофора.

Подбором состава люминофора можно получить искусственный свет, близкий по своему спектру, к дневному свету.

Такие лампы изготавливаются на напряжение 127 *в* мощностью 15 и 20 *вт*, а также на 220 *в* мощностью 30 и 40 *вт* при световой отдаче $\gamma = 35—48$ *лм/вт*. Срок службы их около 3000 час., после

чего световой поток уменьшается до 70% номинального значения.

Схема включения люминесцентной лампы в электрическую сеть переменного тока с частотой 50 гц представлена на рис. 173.

Как и все лампы газового разряда, люминесцентные лампы для стабилизации дугового разряда включаются последовательно со специальным дросселем *Д*.

Включение лампы в сеть осуществляется специальным пускателем *Ст*, который замыкает цепь электродов *Э* для их подогрева на 2—3 сек., после чего автоматически ее размыкает.

В качестве пускателя обычно используют неоновую лампу тлеющего разряда с биметаллическими электродами, хотя в отдельных случаях допускается использование для этой цели обычной звонковой кнопки с *надержным самовозвратом*.

Конденсатор $C_1 = 10\,000$ мкф служит для предотвращения возникновения радиопомех.

Дроссель *Д*, используемый в качестве балластного сопротивления, приводит к снижению коэффициента мощности установки до 0,5—0,6.

Для повышения его значения до 0,8—0,9 включают конденсатор $C_2 = 4—6$ мкф.

Наиболее эффективна работа люминесцентных лам при температуре окружающей среды $t = 20—25^\circ$.

Повышение и понижение напряжения для ламп накаливания и люминесцентных ламп по отношению к номинальному — вредно.

Первое хотя и увеличивает светоотдачу, но резко снижает срок службы лампы.

Второе уменьшает экономичность установки, а при люминесцентных лампах может вызвать прекращение нормальной работы светотехнической установки, так как при понижении напряжения более чем на 10% от номинального люминесцентные лампы обычно не зажигаются.

Для перераспределения светового потока в желаемом направлении и уменьшения слепящего действия лампы заключают в специальную светотехническую арматуру, образующую с ней так называемый светильник.

При лампах накаливания осветительная арматура обычно представляет собой тело вращения (рис. 174), а при люминесцентных лампах она имеет корытообразную форму (рис. 175).

Тип светильника определяет форму освещаемой поверхности (круг, прямоугольник и т. п.), а также закон распределения величины освещенности в различных точках поверхности.

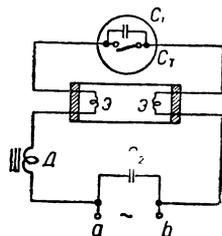


Рис. 173. Схема включения люминесцентной лампы.

Объем, заключенный между поверхностью, образующими которой являются кривые освещенности, и освещаемой поверхностью, представляет собой поток света, излучаемый светильником

$$F_{\text{св}} = \int_s EdS, \quad (2)$$

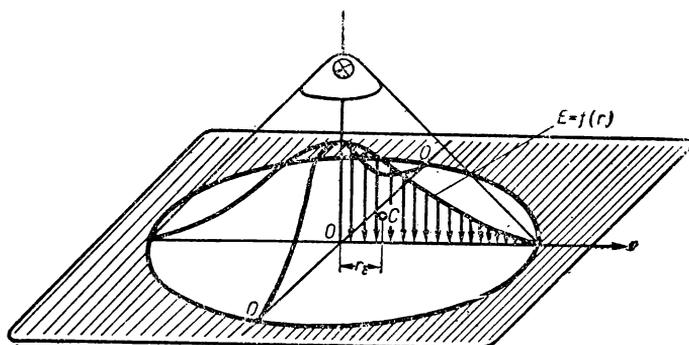


Рис. 174. Кривые освещенности в пространственном изображении при арматуре, являющейся телом вращения, с лампой накаливания.

где dS — элемент освещаемой поверхности, m^2 ;
 E — величина освещенности на ней, $лк$.

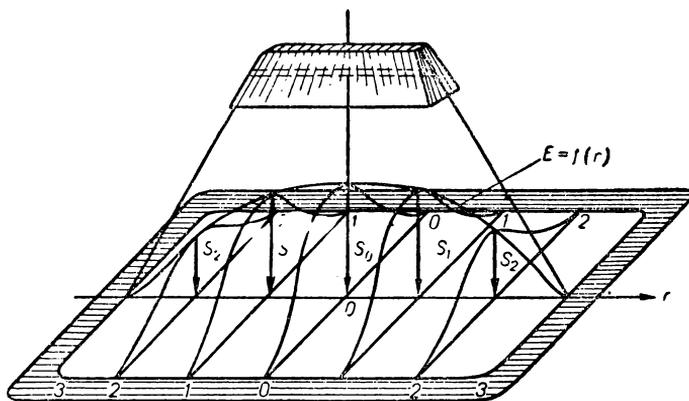


Рис. 175. Кривые освещенности в пространственном изображении при корытообразной арматуре с люминесцентной лампой.

Если светильник представляет собой тело вращения, световой поток $F_{\text{св}}$ подсчитывается так:

$$F_{\text{св}} = \pi S_0 r_c, \quad (3)$$

где S_0 — меридиональная площадь, ограниченная кривой освещенности и ее проекцией на освещаемую поверхность, лкм;

r_c — расстояние от вертикальной оси светильника до центра тяжести C фигуры, заштрихованной на рис. 174.

При корытообразном светильнике эта же величина определяется из соотношения

$$F_{св} \cong \left(S_0 + 2 \sum_{i=1}^{i=n-1} S_i \right) \Delta l, \quad (4)$$

где S_0 — площадь, ограниченная кривой освещенности, проходящей через вертикальную ось светильника по его поперечной оси $O-O$, и ее проекцией на освещаемую поверхность, лкм;

S_i — аналогичные площади по сечениям $1-1, 2-2, \dots, n-n$, которые параллельны плоскости S_0 , лкм;

Δl — расстояние между вышеуказанными сечениями, м.

Величины площадей $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{n-1}$ могут быть найдены путем планиметрирования соответствующих диаграмм распределения освещенности по отдельным направлениям, выбранным на освещаемой поверхности.

Отношение

$$\eta_{св} = \frac{F_{св}}{F_n}, \quad (5)$$

где F_n — номинальный световой поток лампы называется коэффициентом полезного действия светильника.

Величина средней освещенности $E_{ср}$ находится из выражения

$$F_{ср} = \frac{F_{св}}{S}, \quad (6)$$

где S — величина освещаемой поверхности, м².

При изменении напряжения, подводимого к лампе, изменяется ее световой поток, величина которого может быть определена из соотношения

$$F_l = F_n \frac{E_l}{E_n}, \quad (7)$$

где E_l и E_n — освещенности, измеренные в одной и той же точке освещаемой поверхности соответственно при установленном и номинальном значении величины напряжения.

Измеряют величину освещенности фотоэлектрическим люксметром.

Последний состоит из фотоэлемента с запирающим слоем, к которому присоединен микроамперметр (рис. 176).

Такой фотоэлемент обладает свойством генерировать небольшую электродвижущую силу под действием падающего на него светового потока.

К числу подобных фотоэлементов относится вентиляльный селеновый фотоэлемент.

Он состоит из стальной полированной пластинки 4, на которую возгонкой в вакууме нанесен слой селена 3, а затем после термической обработки поверх него путем катодного распыления наносят тончайший прозрачный слой золота или платины 1. Последний является вторым электродом фотоэлемента, который для предохранения от механических повреждений покрывается тонким слоем прозрачного лака.

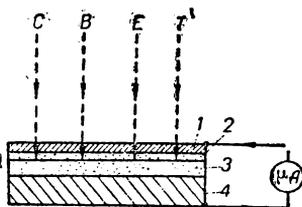


Рис. 176. Схема вентиляльного селенового фотоэлемента.

На поверхности селена, соприкасающегося с поверхностью золота или платины 1, образуется так называемый запирающий слой 2, обладающий односторонней проводимостью при наличии достаточно сильно выраженного фотоэффекта.

Под влиянием света, падающего на фотоэлемент, освободившиеся из селена электроны проникают сквозь запирающий слой 2, в результате чего между сталью 4 и золотом или платиной 1 возникает некоторая разность потенциалов, вызывающая появление в присоединенном к зажимам фотоэлемента микроамперметре фототока.

Величины возникающих э. д. с. и фототока зависят от освещенности фотоэлемента падающим световым потоком.

При малых сопротивлениях внешней цепи между возникающим фототоком и освещенностью наблюдается почти линейная зависимость, которая нарушается при больших значениях величины внешнего сопротивления, в результате чего шкала прибора, градуированная в люксах, будет неравномерной.

В селеновых фотоэлементах при освещенности 10 лк возникает э. д. с. порядка 50—70 мв, а чувствительность их составляет 250—500 мка/лм и зависит от величины сопротивления внешней цепи.

Академиком А. Ф. Иоффе, сотрудниками Академии наук Украинской ССР были получены серно-серебряные и серно-талиевые вентиляльные фотоэлементы, из которых последние имеют чувствительность в среднем 4000—6000 мка/лм.

К ультрафиолетовым и инфракрасным лучам селеновый фотоэлемент имеет малую чувствительность, а серно-талиевый хорошо работает не только в области видимого света, но прекрасно реагирует на инфракрасные лучи.

Для сохранения стабильных параметров вентиляльных фотоэлементов их следует хранить в темном месте при температуре не выше 50°, не подвергать длительной освещенности, превышающей 1000 лк, оберегать от влаги, концентрированных паров сильных окислителей и всевозможных механических повреждений.

Так как различные фотоэлементы неодинаково реагируют на излучение, то в процессе измерений их следует закрывать соответствующим светофильтром. В частности, при измерении освещенности от люминесцентных ламп фотоэлемент следует закрывать специальным желто-зеленым светофильтром, который имеет пониженное пропускание в фиолетовой и красной части спектра.

При измерении больших величин освещенности фотоэлемент необходимо закрывать густым светофильтром.

Обычно светофильтры уменьшают освещенность в пять, десять, пятьдесят, сто и более раз.

При пользовании светофильтрами показания прибора должны быть умножены на соответствующую кратность фильтра K .

Следует помнить, что поверхность фильтра, обращенная к источнику света, должна быть *матовой*, так как при зеркальной поверхности или близкой к ней значительная часть света не попадет на фотоэлемент, отражаясь от поверхности светофильтра, и измерение будет неверным.

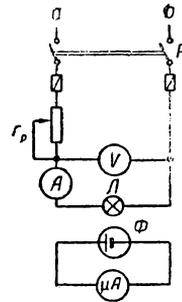


Рис. 177. Схема исследования светильника с лампой накаливания.

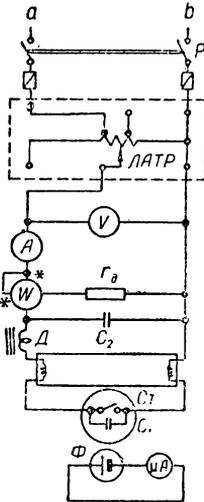


Рис. 178. Схема исследования светильника с люминесцентной лампой.

Описание схемы установки

Лампа накаливания $Л$ (рис. 177) питается через регулировочный реостат r_p , при помощи которого можно устанавливать различное напряжение на ее зажимах.

Вольтметром V и амперметром A определяют электрические показатели источника света.

Освещенность в различных точках освещаемой горизонтальной поверхности измеряется при помощи вентильного фотоэлемента Φ с присоединенным к его зажимам микроамперметром μA .

Для исследования светильника с люминесцентной лампой собирается схема (рис. 178), регулирование подводимого напряжения осуществляется при помощи регулировочного автотрансформатора ЛАТР, а электроизмерительная аппаратура позволяет измерять подводимое напряжение, потребляемый ток и мощность.

Для удобства проведения опыта освещаемое поле разделено взаимно перпендикулярной системой прямых, в точках пересечения которых располагается фотоэлемент для измерения величины освещенности.

Проведение опыта

1. Собрать схему исследования светильника с лампой накаливания.

2. Замкнуть двухполюсный рубильник, убедиться в исправном действии всей аппаратуры и проверить работу фотоэлемента.

3. Измерить расстояние между соседними линиями, проведенными на освещаемой поверхности.

Результаты измерений внести в таблицу.

№ опытов	Расстояние, м, между прямыми, параллельными	
	поперечной оси $O-O$ $\Delta l''$	продольной оси $O-r$ $\Delta l'$
1		

4. Устранить все другие источники света, имеющиеся в помещении, кроме исследуемого светильника, закрыть фотоэлемент дымчатым светофильтром, установить и *поддерживать* на протяжении всего опыта номинальное напряжение для лампы накаливания.

Фотоэлемент располагать в различных точках освещаемой поверхности, которые лежат на линиях, параллельных поперечной оси, и по микроамперметру определять величину освещенности в делениях шкалы прибора.

Данные наблюдений свести в таблицу.

лежащих на линиях	Величина освещенности (в делениях шкалы) в точках,					
	отстоящих от продольной оси на расстоянии, м					
	Δl	$2\Delta l$	$3\Delta l$	$4\Delta l$	$5\Delta l$	$6\Delta l$
$O-O$						
$1-1$						
$2-2$						
$3-3$						
$4-4$						
$5-5$						

Кратность дымчатого светофильтра: $K_1 = 1,5$

Цена деления микроамперметра: 1 дел. = $\mu\text{к}$

5. Поместить фотоэлемент в точку с наибольшей освещенностью и измерить последнюю при различных напряжениях, подводимых к лампе накаливания, изменяя его в пределах от $1,1U_n$ до $0,8U_n$.

Результаты наблюдений свести в таблицу.

№ опытов	Напряжение $U, в$	Ток $I, а$	Освещенность $E, делений$
1			
2			
3			
4			
5			
6			

6. Составить перечень использованной аппаратуры и записать данные лампы накаливания и тип светильника.

7. Собрать схему исследования светильника с люминесцентной лампой.

8. После проверки схемы руководителем замкнуть двухполюсный рубильник, установить номинальное напряжение при помощи регулировочного автотрансформатора ЛАТР, закрыть фотоэлемент желто-зеленым светофильтром и повторить опыт, описанный в четвертом пункте, записав значение кратности примененного светофильтра ($K_2 = 2$).

9. Повторить опыт пятого пункта с люминесцентной лампой до того наименьшего напряжения, при котором затухает лампа.

В таблицу наблюдений добавить графу, отвечающую потребляемой мощности $P, вт$.

10. Составить перечень всей аппаратуры, использованной при исследовании светильника с люминесцентной лампой, записав ее паспортные данные (напряжение, мощность, тип).

Обработка результатов испытания

1. Рассчитать и построить кривые освещенности по продольной и по поперечной оси светильников по параллельным ей линиям, с учетом цены деления микроамперметра и кратности светофильтров для лампы накаливания и люминесцентной лампы.

2. Определить световой поток обоих светильников и их коэффициент полезного действия.

3. Подсчитать световой поток F_d и световую отдачу γ обоих исследованных источников света при различных напряжениях на их зажимах, полагая, что к. п. д. светильников,— величина постоянная, а также вычислить среднюю освещенность $E_{ср}$.

Результаты расчетов свести в таблицу.

№ опытов	Лампа накаливания						Люминесцентная лампа					
	$U, в$	$I, а$	$P, вт$	$F_d, лм$	$\gamma, лм/вт$	$E_{ср}, лк$	$U, в$	$I, а$	$P, вт$	$F_d, лм$	$\gamma, лм/вт$	$E_{ср}, лк$
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												

4. Построить кривые зависимости: $F = \psi(U)$, $\gamma = \psi(U)$, $E_{ср} = \psi(U)$ и дать заключение о влиянии величины напряжения на световые характеристики ламп и на экономичность их работы.

5. Привести значение коэффициента мощности светильника с люминесцентной лампой, работающей при номинальном режиме.

Литература

Касаткин А. С., Перекалин М. А., Электротехника, ГЭИ, 1955, стр. 310—315.

Китаев Е. В., Гревцев Н. Ф., Курс общей электротехники, ГЭИ, 1950, стр. 659—671, 622—628.

Бельский И. Р., Бесекерский В. А., Донской А. В., Пресс С. А., Юрковский Е. К., Общая электротехника, ГЭИ, 1951, стр. 517—535, 508—511.

Иванов А. А., Электрооборудование пищевых предприятий, Гостехиздат УССР, 1956, стр. 28—216, 222—223, 227—229.

Условные буквенные обозначения основных расчетных величин
и единицы их измерения

Наименование величины	Обозначение	
	величины	единицы измерения
Время	t	сек.
Давление	p	кг/см ²
Длина	l	м
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	$\frac{\phi}{\phi}$
Емкость	C	ϕ
Индуктивность	L	гн
Индуктивность взаимная	M	гн
Количество электричества, заряд электрический	q, Q	к
Коэффициент магнитного рассеяния	σ	—
Коэффициент полезного действия	η	—
Коэффициент связи	κ	—
Коэффициент электрического сопротивления температурный	α	град ⁻¹
Магнитный поток	Φ	вб
Магнитная индукция	B	вб/м ²
Магнитная проницаемость	μ	$\frac{гн}{м}$
Момент инерции	J	м ⁴
Мощность активная	P	вт, кет
Мощность мгновенная	p	ва, ква
Мощность полная	S	ва, ква
Мощность реактивная	Q	вар, квар
Напряжение электрическое	U	в, кв

Наименование величины	Обозначение	
	величины	единицы измерения
Напряженность магнитного поля	H	a/m
Напряженность электрического поля	E	v/m
Освещенность	E	$лк$
Период	T	сек.
Плотность тока	j	a/mm^2
Постоянная сдвига фаз	a	$рад$
Потенциал скалярный электрический	φ	v
Проводимость активная электрическая	g	$ом^{-1}$
Проводимость полная электрическая	y	$ом^{-1}$
Проводимость реактивная электрическая	b	$ом^{-1}$
Проводимость удельная электрическая	γ	$\frac{м}{ом \cdot мм^2}$
Работа, энергия	A	дж, вт-сек
Световой поток	F	$лм$
Световая энергия	L	лм-сек, лм-ч
Сила света	I	$св$
Сдвиг фаз между напряжением и током	φ	$рад$
Сечение проводника	s	$мм^2$
Скорость вращения	n	об/мин
Сопротивление активное электрическое	r	$ом$
Сопротивление полное электрическое	z	$ом$
Сопротивление реактивное электрическое	x	$ом$
Сопротивление удельное электрическое	ρ	$\frac{ом \cdot мм^2}{м}$
Теплоемкость	C	кал
Температура абсолютная	θ	$^{\circ}$ абс
Температура по стоградусной шкале	ϑ	$^{\circ}C$
Ток электрический	i, I	$a, ка$
Угол диэлектрических потерь	δ	град.
Фаза начальная	ψ	$рад$

Наименование величины	Обозначение	
	величины	единицы измерения
Частота	f	гц
Частота угловая	ω	рад/сек
Число витков	w	—
Число фаз многофазной системы	m	—
Электродвижущая сила	e, E	в
Энергия активная	W_a	вт-с, квт-ч
Энергия реактивная	W_p	вар-сек, квар-ч
Яркость освещения	B	сб

Приложение 2

Условные графические обозначения в электрических схемах

1. Род тока и напряжения

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Постоянный ток. Напряжение постоянного тока	
2	Переменный ток. Напряжение переменного тока	
3	Постоянный и переменный ток (для устройства, пригодных для обоих родов тока)	
4	Переменный ток с числом фаз m и частотой f , гц	$m \sim f$
5	Переменный ток трехфазный 50 гц (если на данном чертеже встречается лишь одна частота 50 гц)	$3 \sim$
6	Положительная полярность	
7	Отрицательная полярность	

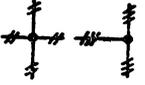
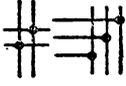
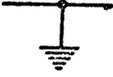
2. Виды соединений обмоток

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Однофазная обмотка с двумя выводами	
2	Однофазная обмотка с двумя выводами и выведенной нейтральной (средней) точкой	
3	Соединение обмоток двух фаз в открытый треугольник	

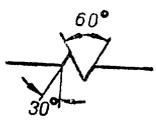
№ по пор.	Наименование	Обозначение
4	Трехфазная обмотка с соединением в звезду	
5	Трехфазная обмотка с соединением в звезду с выведенной нейтральной (средней) точкой	
6	Трехфазная обмотка с соединением в треугольник	
7	Трехфазная обмотка с соединением трех фаз в разомкнутый треугольник	
8	Трехфазная обмотка с соединением в зигзаг	
9	Шестифазная обмотка с соединением в многоугольник	
10	Шестифазная обмотка с соединением в звезду с нейтральной (средней) точкой	
11	Шестифазная обмотка с соединением в звезду и с выведенной нейтральной (средней) точкой	

3. Провода, шины и их соединения

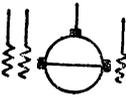
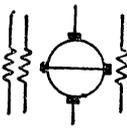
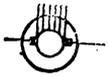
№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейные	многолинейные
1	Провод электрической цепи		
2	Провод, соединенный с нейтральной точкой		
3	Провод экранированный		
4	Провода двухпроводной электрической цепи		
5	Провода четырехпроводной электрической цепи трехфазного тока		
6	Соединение электрическое, зажим		
7	Провода пересекающиеся без электрического соединения		

№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейные	многолинейные
8	Провода пересекающиеся, электрически соединенные, и провода ответвляющиеся		
9	Шина		
10	Шины трехфазной четырехпроводной системы		
11	Повреждение изоляции		
12	Земля		
13	Заземление (соединение провода с землей)		
14	Замыкание проводов трехфазное		
15	Корпус (машины, аппарата и др.)		
16	Пробой изоляции провода на корпус		
17	Соединение провода с корпусом		
18	Контакт аппарата, выведенный на сборку зажимов, например панели		
19	Переемычка на сборке зажимов		

4. Машины вращающиеся

№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейные	многолинейные
1	Обмотки: трансформатора, фазы статора, возбуждения синхронной машины; параллельная обмотка возбуждения машины постоянного тока, обмотка напряжения измерительного прибора, катушка напряжения реле		
2	Последовательная обмотка возбуждения машины постоянного тока, дополнительных полюсов, компенсационная, токовая обмотка измерительного прибора, токовая катушка		
3	Возбуждение от постоянных магнитов		
4	Щетка (на коллекторе, на контактном кольце)		
5	Машина вращающаяся (без указания исполнения ротора или якоря). Общее обозначение		
6	Электродвигатель асинхронный трехфазный с короткозамкнутым ротором		
7	Электродвигатель асинхронный трехфазный с контактными кольцами (допускается выходы ротора делать вниз или влево)		
8	Электродвигатель асинхронный трехфазный с короткозамкнутым ротором и с указанием обмоток		

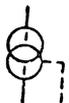
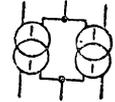
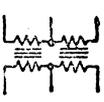
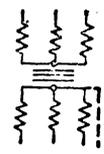
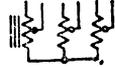
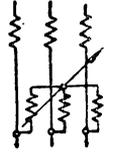
№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
9	Сельсин с однофазным статором (допускается выводы ротора делать вниз или влево)		
10	Сельсин с однофазным ротором (допускается выводы ротора делать вниз или влево)		
11	Сельсин дифференциальный (допускается выводы ротора делать вниз или влево)		
12	Синхронная машина трехфазного тока		
13	Синхронная машина трехфазного тока с выведенной нейтральной (средней) точкой и с указанием обмотки возбуждения		
14	Синхронная машина однофазная с возбуждением от постоянных магнитов		
15	Синхронный реактивный электродвигатель (без обмотки возбуждения постоянного тока и без постоянных магнитов) переменного тока		
16	Машина постоянного тока		

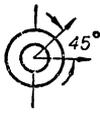
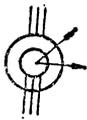
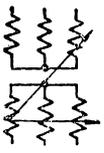
№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
17	Машина постоянного тока с обмотками смешанного возбуждения		
18	Усилитель электромашинный с поперечным полем и несколькими (например тремя) обмотками управления		
19	Машина постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов		
20	Электродвигатель коллекторный однофазный последовательного возбуждения		
21	Преобразователь одноякорный шестифазный		

№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
22	Преобразователь однокорный шестифазный с параллельной обмоткой возбуждения		
23	Преобразователь, состоящий из асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором и генератора постоянного тока		

5. Трансформаторы и автотрансформаторы

№ по пор.	Наименование	Обозначение		
		однолинейное	многолинейное	многолинейное с указанием обмоток
1	Трансформатор однофазный без сердечника			
2	Трансформатор однофазный с сердечником			
3	Трансформатор однофазный трехобмоточный с сердечником			

№ по пор.	Наименование	Обозначение		
		однолинейное	многолинейное	многолинейное с указанием обмоток
4	Вывод нейтральной (средней) точки на одной обмотке у однофазного трансформатора с сердечником			
5	Вывод на одной обмотке у однофазного трансформатора с сердечником			
6	Два трансформатора напряжения с сердечниками однофазных, соединенных в открытый треугольник			
7	Трансформатор трехфазный с сердечником с соединением обмоток звезда—звезда, с выведенной нейтральной (средней) точкой у одной из обмоток			
8	Автотрансформатор однофазный с сердечником			
9	Автотрансформатор трехфазный с сердечником с соединением обмоток в звезду			
10	Автотрансформатор трехфазный поворотный (индукционный регулятор)			

№ по пор.	Наименование	Обозначение		
		однолинейное	многолинейное	многолинейное с указанием обмоток
11	Трансформатор трехфазный поворотный (фазорегулятор)			
12	Трансформатор тока с одной вторичной обмоткой			
13	Трансформатор тока с двумя вторичными обмотками			

6. Выпрямители (вентили) полупроводниковые и ртутные

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Вентиль — общее обозначение. Вентиль полупроводниковый	
2	Вентиль ртутный без управляющей сетки. Общее обозначение	
3	Вентиль ртутный с управляющей сеткой. Общее обозначение	
4	Вентиль ртутный одноанодный с зажиганием и возбуждением от постоянного тока с управляющей сеткой	
5	Игнитрон без управляющей сетки	

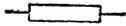
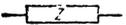
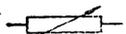
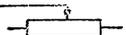
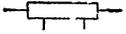
№ по пор.	Наименование	Обозначение
6	Газотрон	
7	Тиратрон	
8	Неоновая лампа	
9	Стабилизатор — делитель напряжения	
10	Одноанодный кенотрон прямого накала	
11	Двуханодный кенотрон косвенного накала	
12	Трехэлектродная лампа (триод) прямого накала	
13	Лучевой тетрод косвенного накала	
14	Пентод прямого накала	
15	Диод — триод прямого накала	
16	Фотоэлемент с внешним фотоэффектом, вакуумный	
17	Фотоэлемент с запирающим слоем	

7. Приборы измерительные

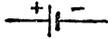
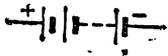
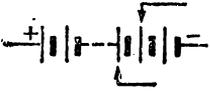
№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Прибор измерительный—показывающий	
2	Прибор измерительный—регистрирующий	
3	Счетчик	
4	Шунт для измерительного прибора	
5	Термоэлемент	
6	Вольтметр показывающий	
7	Амперметр показывающий	
8	Ваттметр показывающий	
9	Вольтамперметр реактивный показывающий	
10	Фазометр показывающий	
11	Частотомер показывающий	
12	Омметр показывающий	
13	Синхроноскоп	
14	Вольтметр регистрирующий	
15	Амперметр регистрирующий	
16	Ваттметр регистрирующий	
17	Вольтамперметр реактивный регистрирующий	

№ по пор.	Наименование	Обозначение
18	Ватт-часов—счетчик	
19	Вольтампер-часов реактивных—счетчик	

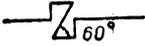
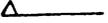
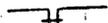
8. Сопротивления

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Сопротивление нерегулируемое, активное, омическое. Общее обозначение	
2	Сопротивление полное	
3	Сопротивление регулируемое	
4	Сопротивление регулируемое без разрыва цепи со скользящим контактом	
5	Сопротивление с отводами	
6	Сопротивление индуктивное без сердечника	
7	Сопротивление индуктивное с сердечником (дроссель)	
8	Дроссель с катушкой подмагничивания	
9	Конденсатор нерегулируемый	
10	Конденсатор регулируемый	

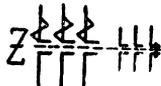
9. Элементы и батареи, гальванические
и аккумуляторные

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Элемент гальванический или аккумуляторный	
2	Батарея из элементов гальванических или аккумуляторных	
3	Батарея из элементов аккумуляторных с двойным элементным коммутатором	

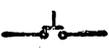
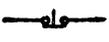
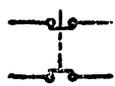
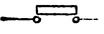
10. Контактные реле

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Катушка контактора	
2	Нагревательный элемент теплового реле	
3	Контакт нормально открытый (НО): <i>a</i> — общее; <i>b</i> и <i>в</i> — допустимые в схемах радиотехники и связи	<p><i>a</i> </p> <p><i>b</i> </p> <p><i>в</i> </p>
4	Контакт нормально закрытый (НЗ): <i>a</i> — общее; <i>b</i> и <i>в</i> — допустимые в схемах радиотехники и связи	<p><i>a</i> </p> <p><i>b</i> </p> <p><i>в</i> </p>

№ по пор.	Наименование	Обозначение
5	Контакт нормально закрытый (НЗ), переключающий с цепи первой на цепь вторую при наличии общей точки: <i>a</i> — общее; <i>b</i> и <i>в</i> — допустимые в схемах радиотехники и связи	
6	Контакт нормально открытый (НО) с гашением	
7	Контакт нормально закрытый (НЗ) с гашением	
8	Контакт нормально открытый (НО) с выдержкой времени при закрывании	
9	Контакт нормально открытый (НО) с выдержкой времени при открывании	
10	Контакт нормально открытый (НО) с выдержкой времени при закрывании и открывании	
11	Контакт нормально закрытый (НЗ) с выдержкой времени при открывании	
12	Контакт нормально закрытый (НЗ) с выдержкой времени при закрывании	
13	Контакт нормально закрытый (НЗ) с выдержкой времени при открывании и закрывании	
14	Контакт нормально закрытый (НЗ), переключающий с цепи первой на цепь вторую при наличии общей точки с выдержкой времени при отключении цепи первой и включении цепи второй	

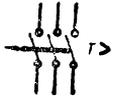
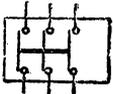
№ по пор.	Наименование	Обозначение
15	Контакт импульсный (проскальзывающий)	
16	Контактор трехполюсный с электромагнитным приводом, с тремя <i>НО</i> главными контактами, с гашением, с двумя <i>НО</i> и одним <i>НЗ</i> блок-контактами	

11. Командоаппараты и реле

№ по пор.	Наименование	Обозначение
1	Кнопка с самовозвратом с нормально открытым (<i>НО</i>) контактом	
2	Кнопка с самовозвратом с нормально закрытым (<i>НЗ</i>) контактом	
3	Кнопка с самовозвратом с одним нормально открытым (<i>НО</i>) и одним нормально закрытым (<i>НЗ</i>) контактами	
4	Выключатель путевой или конечный с нормально открытым (<i>НО</i>) контактом	
5	Выключатель путевой или конечный с нормально закрытым (<i>НЗ</i>) контактом	
6	Реле—общее обозначение	
7	Реле промежуточное	

№ по пор.	Наименование	Обозначение
8	Реле промежуточное с указателем действия, возвращаемым в нормальное положение от руки	
9	Реле указательное с указателем действия, возвращаемым в нормальное положение от руки	
10	Реле тока с зависимой выдержкой времени	

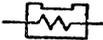
12. Выключатели, переключатели и разъединители

№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
1	Выключатель мощности трехполюсный автоматический воздушный (автомат)		
2	Выключатель мощности автоматический воздушный, например: а) максимального тока — $T >$ б) минимального тока — $T <$ в) минимального напряжения — $H <$		
3	Выключатель мощности трехполюсный неавтоматический воздушный (без расцепителя)		
4	Выключатель мощности трехполюсный (с гашением дуги в масле или струей масла, воды, воздуха и т. п.)		

№ по пор.	Наименование	Обозначение	
		однолинейное	многолинейное
5	Выключатель нагрузки трехполюсный с гашением дуги (разъединитель мощности)		
6	Выключатель трехполюсный Разъединитель трехполюсный		
7	Выключатель с одним нормально открытым (НО) и двумя нормально закрытыми (НЗ) контактами		
8	Переключатель трехполюсный. Разъединитель переключающий трехполюсный		
9	Переключатель трехполюсный		
10	Переключатель трехполюсный без разрыва цепи		
11	Переключатель двухполюсный на 4 цепи (вольтметровый)		
12	Штепсельное соединение		
13	Штепсельное соединение в выдвижных разъёмных устройствах и аппаратах		

13. Аппараты разные

№ по пор.	Наименование	Обозначение
<i>а) Аппараты сигнализации</i>		
1	Звонок электрический	
2	Сирена электрическая, гудок, ревун	
3	Лампа сигнальная. Над обозначением иногда добавляется начальная буква слова, указывающего цвет стекла или сигнализируемое состояние, например: <i>Б</i> — белый, <i>К</i> — красный, <i>А</i> — авария, <i>В</i> — включено и т. п.	 
<i>б) Аппараты защиты от перенапряжений и предохранители</i>		
4	Разрядник. Общее обозначение	
5	Разрядник трубчатый	
6	Разрядник вентильный	
7	Предохранитель пробивной	
8	Предохранитель плавкий	
<i>в) Электромагниты</i>		
9	Электромагнит с параллельной обмоткой; <i>а</i> — общее; <i>б</i> — допустимое в схемах радиотехники и связи	<i>а</i>  <i>б</i> 
10	Электромагнит с последовательной обмоткой; <i>а</i> — общее; <i>б</i> — допустимое в схемах радиотехники и связи	<i>а</i>  <i>б</i> 

№ по пор.	Наименование	Обозначение
11	Электромагнит трехфазного тока	
12	<i>г) Печи электрические</i>	
	Дуговая печь. Общее обозначение	
13	Печь сопротивления	
14	Индукционная печь	
15	<i>д) Разное</i>	
	Токоъемник троллейный	
16	Токоъемник кольцевой	
17	Плита электромагнитная	
18	Кабельная разделка	
19	Лампа осветительная	
20	Экран	
21	Знак регулирования. Общее обозначение	
		

Примечание. В электрических схемах размеры и толщина линий условных обозначений принимаются в зависимости от назначения и общих размеров схемы.

Обмотки, катушки и контакты главных цепей и цепей возбуждения вычерчиваются более толстыми линиями, чем те же детали в цепях управления.

Приведенные обозначения, установленные ГОСТ 7624—55, соответствуют горизонтальному размещению цепей схемы; при вертикальном их размещении условные обозначения поворачиваются на 90° против часовой стрелки.

В однолинейных схемах допускается количество проводов обозначать числом черточек, пересекающих обозначение провода под углом 45° на одном из его концов.

Все обозначения аппаратов даются в положении отсутствия напряжения и посторонних механических воздействий на них.

Направление силы, действующей на аппараты на схемах, принято сверху вниз для горизонтального расположения цепей схемы и слева направо для вертикального.

Направление замедленного движения контактов с выдержкой времени соответствует направлению острия треугольника в обозначении контакта.

Фазы сети трехфазного тока высшего напряжения обозначают *A*, *B*, *C*, *0*, а низшего напряжения *a*, *b*, *c*, *0*.

Для обозначения проводов сети постоянного тока приняты обозначения $+$ и $-$.

Внутри обозначения машин может быть обозначен род машины (генератор — *G*, электродвигатель — *D*, тахогенератор — *TG* и т. п.), род тока, число фаз и т. д.

В графическое обозначение измерительных приборов вносятся данные, характеризующие измеряемую величину.

ФОРМА БЛАНКА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

_____ (наименование высшего учебного заведения)

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лаборатория _____ (наименование лаборатории)

Руководитель занятий _____ (фамилия, инициалы)

Студент _____ курса _____ фак., подгруппы
(фамилия, инициалы)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № _____

_____ (наименование лабораторной работы)

I. Цель работы

II. Протокол испытания

I. Схема установки

**2. Перечень измерительной аппаратуры
и оборудования, использованных при проведении
опыта**

№ по пор.	Наименование	Завод-изготовитель	Заводской №	Пределы измерения	Цена деления	Класс точности	Система	Конструкция	Примечания
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

3. Таблицы наблюдений

Испытание произвел студент _____
(подпись)

_____ (число, месяц, год)

Результаты испытания просмотрены

Руководитель занятий _____
(подпись)

3. Графические зависимости

IV. Заключение

Работу выполнил студент _____
(подпись)

(число, месяц, год)

Работа зачтена

Руководитель занятий _____
(подпись)

**ПРАВИЛА ДЛЯ СТУДЕНТОВ,
РАБОТАЮЩИХ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЯХ**

1. К работе в электротехнических лабораториях допускаются студенты, прослушавшие и изучившие соответствующие разделы теоретического курса, в которых освещен материал по предстоящим лабораторным занятиям.

Лица, не изучившие эти разделы, к работе в лаборатории не допускаются.

2. Студенты, работающие в электротехнических лабораториях, разделяются на отдельные бригады по два-три человека в каждой.

3. *Каждый студент, входящий в состав бригады, обязан заблаговременно подготовиться к предстоящему лабораторному занятию по лекционным запискам, рекомендованной учебной литературе и соответствующей методической инструкции; заготовить бланк установленной формы с тщательно вычерченными на нем электрической схемой установки и необходимыми таблицами наблюдений.*

4. Студент, явившийся в лабораторию, должен предъявить руководителю занятий для просмотра заготовленный бланк, после чего бригада, состоящая из двух-трех человек, имеет право приступить к сборке схемы за соответствующим столом.

5. После составления схемы все неиспользованные проводники должны быть сейчас же убраны со стола.

6. *Включать рубильники не разрешается до проверки руководителем правильности соединений приборов, машин и прочей аппаратуры.*

7. В случае каких-либо пересоединений в схеме последняя перед включением должна быть еще раз проверена руководителем.

8. Каждая работа производится с приборами, специально для нее предназначенными.

Брать какие-либо другие приборы без особого разрешения руководителя или лаборанта воспрещается.

9. При работе с проволочными реостатами и амперметрами студенты обязаны следить за тем, чтобы протекающий ток не превышал допустимого значения во избежание пережога последних.

10. Тахометры, секундомеры, гальванометры, термометры и другая специальная аппаратура выдается каждой бригаде непо-

средственно дежурным лаборантом и после окончания испытания немедленно сдается ему обратно.

11. Пользоваться тахометром для измерения скорости вращения машин следует *только* во время производства отсчета, так как при длительной работе он приходит в негодность.

12. Перед остановкой электродвигателя с тормозом, имеющим водяное охлаждение, *сначала прекращают подачу охлаждающей воды, а затем останавливают машину.*

13. В случае порчи какого-либо прибора, студент должен *немедленно* сообщить об этом руководителю.

14. Закончив испытание, каждый студент обязан *до разборки схемы* предъявить руководителю для подписи бланк с результатами наблюдений.

Если результаты опытов будут неудовлетворительные или вовсе не будут предъявлены руководителю, то работа считается невыполненной и назначается студенту вторично.

15. После признания руководителем результатов испытания приемлемыми все соединения должны быть разобраны, соединительные провода аккуратно сложены, приборы собраны, закрыты крышками и завинчены.

16. *Каждый студент к следующему занятию должен представить руководителю отдельный отчет по выполненной работе, без чего он не будет допущен к выполнению очередной работы.*

17. В отчете дается краткое описание содержания задачи, электрическая схема установки, перечисляются все приборы и аппаратура, использованные при испытании с указанием их технических данных, приводятся результаты наблюдений, подсчетов и соответствующие кривые, а также краткое заключение по выполненной работе.

18. Схемы необходимо выполнять тщательно. Кривые рекомендуется вычерчивать на миллиметровой бумаге с нанесением масштабов на координатных осях.

19. При составлении схем и пользовании буквенными и графическими символами следует применять условные обозначения, принятые в электротехнических лабораториях, согласно действующим ГОСТ.

20. *Студентам, работающим в лаборатории, воспрещается дотрагиваться до всевозможных частей, находящихся под напряжением, касаться движущихся и вращающихся частей машин и аппаратов, производить какие бы то ни было переключения на главных распределительных щитах, ртутных выпрямителях и преобразовательных устройствах, делать изменения в схемах под напряжением, разрезать проводники на части, писать мелом на приборах, машинах, аппаратах, щитах и столах, а также производить перемещение лабораторного имущества, расставленного по определенному плану.*

ГРАФИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВУЗОВ

Учебные планы различных специальностей высших учебных заведений предусматривают по курсу общей электротехники и электрооборудованию промышленных предприятий как лекции, так и лабораторные занятия.

В технологических институтах пищевой промышленности на лабораторные занятия дается до 50% общего времени, отводимого для изучения данной дисциплины.

В данном руководстве приведены лабораторные работы в объеме, несколько превышающем количество обязательных работ, которые могут быть поставлены в соответствии со временем, отводимом на этот вид занятий по учебным планам различных специальностей (механической, технологической, инженерно-экономической и др.).

Однако совсем не предполагается, что каждый студент должен обязательно выполнить все работы, описание которых дано в данном руководстве.

Некоторые работы близки по своему характеру и могут быть взаимозаменяемы в зависимости от профиля подготавливаемого специалиста и наличия соответствующего оборудования электротехнических лабораторий.

Дополнительные работы могут быть выполнены студентами факультативно и самостоятельно в секции научного студенческого общества (НСО) в порядке личной инициативы.

Планирование лабораторных работ имеет цель по возможности обеспечить выполнение их параллельно с изложением соответствующей части теоретического курса, что способствует лучшему усвоению читаемых лекций.

Порядок выполнения лабораторных работ и их объем должен определяться кафедрой, отвечающей за постановку и изложение курса общей электротехники и электрооборудования промышленных предприятий.

Рациональная организация лабораторного процесса может быть только тогда, когда лабораторные работы выполняются вслед за прохождением одного или нескольких разделов теоретического курса.

Методика проведения лабораторных занятий неразрывно связана с оборудованием электротехнических лабораторий и организаций технического обслуживания учебных работ.

Из существующих форм организации лабораторных работ можно избрать фронтальное выполнение или выполнение их в шахматном порядке.

При фронтальном проведении лабораторных занятий все студенты одной учебной подгруппы (10—15 человек) выполняют одну и ту же работу, пользуясь однотипными приборами и соответствующим оборудованием.

Преимуществом такой организации занятий является то, что лабораторные работы могут выполняться непосредственно после прохождения части темы курса, способствуя закреплению и расширению знаний студентов.

Фронтальная постановка лабораторных занятий позволяет преподавателю одновременно руководить и следить за работой всех студентов, проводить групповой инструктаж, давать для всей группы указания по ходу выполнения лабораторной работы, вскрывать характерные ошибки.

Однако такая система занятий требует наличия значительного количества оборудования, что часто затрудняет постановку однотипных лабораторных работ.

При недостаточной оснащенности электротехнических лабораторий однотипным оборудованием выполнение лабораторных работ может осуществляться в шахматном порядке, который заключается в том, что студенты выполняют разные работы бригадами по 2—4 человека по определенному графику.

По выполнении очередной работы студенческая бригада переходит в дальнейшем к следующей лабораторной работе.

Таким образом, одна бригада начинает с первой работы, а другие с последующих, после чего они меняются местами в соответствии с графиком выполнения лабораторных работ.

Подобная организация выполнения лабораторных работ позволяет при ограниченном оборудовании выполнить все лабораторные работы, предусмотренные программой.

В каждом конкретном случае решение вопроса планирования лабораторных работ находится в зависимости от наличия соответствующей аппаратуры, возможностей электротехнических лабораторий и количества учебных групп, которые одновременно проходят практикум.

Весьма полезно перед выполнением некоторых лабораторных работ 15—20 мин. посвятить решению конкретного примера на данную тему занятий.

Ниже приводятся примерные графики прохождения лабораторного практикума учебной подгруппой (10—15 человек) применительно к количеству времени, намечаемому учебными планами технологических институтов пищевой промышленности для различных специальностей.

1. Механический факультет—специальность № 0517 :
„Машины и аппараты пищевых производств“

Виды занятий	Количество часов учебных занятий			
	Семестры			
	6-й	7-й	8-й	Общее
Лекции	2 час.×16 нед.=32	4 час.×12 нед.=48	2 час.×10 нед.=20	100
Лабораторные занятия	2 час.×16 нед.=32	4 час.×12 нед.=48	1 час.×10 нед.=10	90
Итого	4 час.×16 нед.=64	8 час.×12 нед.=96	3 час.×10 нед.=30	190

III курс—6-й семестр (16 недель)

Количество лабораторных работ—13

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	4
I	Введение—2 час.	Ознакомление с оборудованием электротехнических лабораторий и правилами работы в них—2 час.			
II	Часть I. Основы электротехники 1. Электрическая цепь постоянного тока—4 час.	Изучение электротехнической аппаратуры—2 час.			
III		1	2	1	2
IV	2. Диэлектрики в электрическом поле—3 час. 3. Электромагнетизм—5 час.	2	1	2	1
V		3	4	3	4
VI		4	3	4	3
VII		5	5	5	5

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	4
VIII	4. Цепь однофазного тока—10 час.	8	9	8	9
IX		9	8	9	8
X		10	11	10	11
XI		11	10	11	10
XII		12	13	12	13
XIII	5. Трехфазный ток—5 час.	13	12	13	12
XIV		14	16	14	16
XV		16	14	16	14
XVI	6. Электрические измерения—3 час.	Подведение итогов лабораторных занятий—2 час.			
Итого	лекций 2 час. × 16 нед. = = 32 час.	лабор. занят. : 2 час. × 16 нед. = = 32 час.			
Всего	4 час. × 16 нед. = 64 часа				

IV курс—7-й семестр (12 недель)

Количество лабораторных работ—21

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	
I	Часть II. Электрические машины	Изучение конструкций трансформаторов—2 час.			
I		1. Трансформаторы—5 час.	19	19	19
II			20	20	20
II			21	22	23
III		2. Асинхронные машины—7 час.	22	23	21
III			23	21	22

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад		
		1	2	3
IV	3. Синхронные машины—5 час.	Изучение конструкций асинхронных и синхронных машин—2 час.		
IV		24	25	26
V		25	26	27
V		26	27	29
VI	4. Коллекторные машины—7 час.	27	29	24
VI		29	24	25
VII	Часть III. Электроника	33	35	36
VII	4 час.	35	36	33
VIII	Часть IV. Электрический привод	36	33	35
VIII	1. Основы теории электропривода—5 час.	38	39	40
IX	2. Выбор электропривода для пищевых производств—3 час.	39	40	38
IX		40	38	39
X	3. Электрическая аппаратура—3 час.	41	42	43
X		42	43	44
XI	4. Управление электроприводами—5 час.	43	44	45
XI		44	45	41
XII	Часть V. Специальное электрооборудование пищевых предприятий—4 час.	45	41	42
XII		Подведение итогов лабораторных занятий—2 час.		
Итого	лекций : 4 час. × 12 нед. = 48 час.	лабор. занят. : 4 час. × × 12 нед. = 48 час.		
Всего	8 час. × 12 нед. = 96 час.			

IV курс—8-й семестр (10 недель)

Количество лабораторных работ—3

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад		
		1	2	3
I	Часть VI. Электроснабжение пищевых предприятий	Изучение схем электроснабжения пищевых предприятий—2 час.		
II	1. Электроснабжение пищевых предприятий—3 час.	—	—	—
III	2. Трансформаторные подстанции и электростанции пищевых предприятий—4 час.	Экскурсия на трансформаторную подстанцию—2 час.		
IV	3. Распределение электрической энергии на пищевом предприятии—2 час.	—	—	—
V		48	49	50
VI	4. Вопросы улучшения коэффициента мощности—3 час.	—	—	—
VII	5. Электрическое освещение пищевых предприятий—2 час.	49	50	48
VIII	Часть VII. Эксплуатация электрооборудования пищевых предприятий	—	—	—
	1. Монтаж и ремонт электрооборудования—2 час.			
IX	2. Эксплуатация электрохозяйства—2 час.	50	48	49
X	3. Основы техники электробезопасности—2 час.	—	—	—
Итого	лекций: 2 час. × 10 нед. = 20 час.	лабор. занят.: 2 час. × 5 нед. = 10 час.		
Всего	3 час. × 10 нед. = 30 час.			

2. Технологический факультет—специальность № 1001:

„Хранение и технология переработки зерна“

Виды занятий	Количество часов учебных занятий		
	Семестры		Общее
	7-й	8-й	
Лекции	3 час. × 14 нед. = 42	3 час. × 11 нед. = 33	75
Лабораторные занятия	2 час. × 14 нед. = 28	3 час. × 11 нед. = 33	61
Итого	5 час. × 14 нед. = 70	6 час. × 11 нед. = 66	136

IV курс—7-й семестр (14 недель)

Количество лабораторных работ—12

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	4
I	Введение—2 час.	Ознакомление с оборудованием электротехнических лабораторий и правилами работы в них—2 час.			
I	Часть I. Основы электротехники	—	—	—	—
II		1. Электрическая цепь постоянного тока—4 час.	1	2	1
III	2. Диэлектрики в электрическом поле—2 час.	2	1	2	1
III	3. Электромагнетизм—4 час.	—	—	—	—
IV		3	4	3	4
V	4. Цепь однофазного тока—7 час.	4	3	4	3
V		—	—	—	—
VI		5	5	5	5

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	4
VII	5. Трехфазный ток—3 час.	8	9	8	9
VII		—	—	—	—
VIII	6. Электрические измерения—2 час.	9	8	9	8
IX	Часть II. Электрические машины 1. Трансформаторы—4 час.	10	11	10	11
IX		—	—	—	—
X	2. Асинхронные машины—5 час.	11	10	11	10
XI		13	14	13	14
XI	3. Синхронные машины—4 час.	—	—	—	—
XII		14	13	14	13
XIII	4. Коллекторные машины—5 час.	16	16	16	16
XIII		—	—	—	—
XIV	Подведение итогов лабораторных занятий—2 час.				
Итого	лекций : 3 час. × 14 нед. = = 42 час.	лабор. занят. : 2 час. × 14 нед. = = 28 час.			
Всего	5 час. × 14 нед. = 70 час.				

IV курс—8-й семестр (11 недель)

Количество лабораторных работ—16

Недели	Число и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад		
		1	2	3
I	Часть III. Электроника—3 час.	19	20	21
I	Часть IV. Электрический привод	20	21	22
II		1. Основы теории электропривода—3 час.	21	22
III	2. Выбор электропривода для пищевых производств—8 час.	22	19	20
III		23	24	27
IV		24	27	23
V	4. Управление электроприводами—5 час.	27	23	24
V		33	35	40
VI		35	40	33
VII	Часть V. Специальное электрооборудование пищевых предприятий—2 час.			
	Часть VI. Электроснабжение пищевых предприятий			
	1. Электроснабжение пищевых предприятий—1 час.	40	33	35
VII	2. Трансформаторные подстанции и электростанции пищевых предприятий—2 час.	41	43	45
VIII	3. Распределение электрической энергии на пищевом предприятии—2 час.	43	45	41

Недели	Число и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад		
		1	2	3
IX	4. Вопросы улучшения коэффициента мощности—3 час.	45	41	43
IX	5. Электрическое освещение пищевых предприятий—2 час.	48	49	50
X	Часть VII. Эксплуатация электрооборудования пищевых предприятий 1. Монтаж и ремонт электрооборудования—1 час.	49	50	48
XI	2. Эксплуатация электрохозяйства—2 час.	50	48	49
XI	3. Основы техники электробезопасности—2 час.	Подведение итогов лабораторных занятий—2 час.		
Итого	лекций : 3 час. \times 11 нед. = 33	лабор. занят. : 3 час. \times 11 нед. = 33		
Всего	6 час. \times 11 нед. = 66			

3. Инженерно-экономический факультет—специальность № 1718:

„Экономика и организация промышленности продовольственных товаров“

Виды занятий	Количество часов учебных занятий		
	Семестр		Общее
Лекции	3 час. \times 14 нед. = 42	2 час. \times 13 нед. = 26	68
Лабораторные занятия	2 час. \times 14 нед. = 28	2 час. \times 13 нед. = 26	54
Итого	5 час. \times 14 нед. = 70	4 час. \times 13 нед. = 52	122

III курс—6-й семестр (14 недель)

Количество лабораторных работ—12

Недели	Части и разделы курсов и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	4
I	Введение—2 час.	Ознакомление с оборудованием электротехнических лабораторий и правилами работы в них—2 час.			
I	Часть I. Основы электротехники	—	—	—	—
II		1. Электрическая цепь постоянного тока—4 час.	1	2	1
III	2. Диэлектрики в электрическом поле—2 час.	2	1	2	1
III	3. Электромагнетизм—4 час.	—	—	—	—
IV		3	5	3	5
V	4. Цепь однофазного тока—7 час.	5	3	5	3
V		—	—	—	—
VI		8	9	8	9
VII		9	8	9	8
VII	5. Трехфазный ток—3 час.	—	—	—	—
VIII	6. Электрические измерения—2 час.	10	11	10	11
IX	Часть II. Электрические машины	11	10	11	10
IX	1. Трансформаторы—4 час.	—	—	—	—

Недели	Части и разделы курса и количество часов, необходимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад			
		1	2	3	4
X	2. Асинхронные машины— 5 час.	13	14	13	14
XI		14	13	14	13
XI		—	—	—	—
XII	3. Синхронные машины— 4 час.	16	20	16	20
XIII		20	16	20	16
XIII		—	—	—	—
XIV	4. Коллекторные машины— 5 час.	Подведение итогов лабораторных занятий—2 час.			
Итого	лекций : 3 час. × 14 нед. = = 42 час.	лабор. занят. : 2 час. × 14 нед. = = 28 час.			
Всего	5 час. × 14 нед. = 70 час.				

IV курс—7-й семестр (13 недель)

Количество лабораторных работ—12

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад		
		1	2	3
I	Часть III. Электроника—3 час.	21	22	24
II	Часть IV. Электрический привод	22	24	21
III	1. Основы теории электропривода—3 час.	24	21	22
IV	2. Выбор электропривода для пищевых производств—2 час.	27	33	35

Недели	Части и разделы курса и количество часов, отводимое на лекции	№ лабораторных работ для студенческих бригад		
		1	2	3
V	3. Электрическая аппаратура—2 час.	33	35	27
VI	4. Управление электроприводами—2 час.	35	27	33
VII	Часть V. Электроснабжение пищевых предприятий 1. Электроснабжение пищевых предприятий—1 час.	40	41	43
VIII	2. Трансформаторные подстанции и электростанции пищевых предприятий—2 час.	41	43	40
IX	3. Распределение электрической энергии на пищевом предприятии—2 час.	43	40	41
X	4. Вопросы улучшения коэффициента мощности—3 час.	45	48	49
XI	5. Электрическое освещение пищевых предприятий—2 час.	48	49	45
XII	Часть VI. Эксплуатация электрооборудования пищевых предприятий 1. Монтаж и ремонт электрооборудования—1 час.	49	48	45
XIII	2. Эксплуатация электрохозяйства—2 час. 3. Основы техники электробезопасности—1 час.	Подведение итогов лабораторных занятий—2 час.		
Итого	Лекций : 2 час. \times 13 нед. = 26 час.	Лаб. занят. : 2 час. \times 13 нед. = 26 час.		
Всего	4 час. \times 13 нед. = 52 час.			

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	
Организация и порядок выполнения лабораторных работ	5
Электронизмерительные приборы	7
Вспомогательное оборудование	18
Источники питания установок электротехнических лабораторий	24

ЧАСТЬ I

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Раздел 1

Постоянный ток, электрическое и магнитное поле

<i>Работа № 1.</i> Передача электрической энергии постоянным током	27
<i>Работа № 2.</i> Проверка основных законов цепи постоянного тока	32
<i>Работа № 3.</i> Испытание электронагревательного прибора	37
<i>Работа № 4.</i> Исследование переходных процессов при зарядке и разрядке конденсатора	43
<i>Работа № 5.</i> Испытание постоянных магнитов	51
<i>Работа № 6.</i> Исследование перенапряжений при выключении индуктивности	56

Раздел 2

Переменный ток

<i>Работа № 7.</i> Передача электрической энергии однофазным током	62
<i>Работа № 8.</i> Исследование последовательной цепи однофазного тока	68
<i>Работа № 9.</i> Исследование параллельной цепи однофазного тока	74
<i>Работа № 10.</i> Исследование трехфазной системы при соединении нагрузки звездой	82
<i>Работа № 11.</i> Исследование трехфазной системы при соединении нагрузки треугольником	90

*Раздел 3***Электрические измерения**

<i>Работа № 12.</i> Проверка градуировки технических амперметра и вольтметра по контрольным приборам	98
<i>Работа № 13.</i> Проверка счетчика активной энергии однофазного тока	104
<i>Работа № 14.</i> Измерение сопротивления методом вольтметра и амперметра	111
<i>Работа № 15.</i> Измерение сопротивлений по методу мостика	116
<i>Работа № 16.</i> Измерение сопротивления изоляции проводов мегомметром	119
<i>Работа № 17.</i> Измерение температур электрическим методом	124
<i>Работа № 18.</i> Измерение линейных перемещений индуктивным датчиком	127

*ЧАСТЬ II***ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ***Раздел 4***Трансформаторы и бесколлекторные электрические машины**

<i>Работа № 19.</i> Испытание трансформатора однофазного тока	131
<i>Работа № 20.</i> Испытание трансформатора трехфазного тока	137
<i>Работа № 21.</i> Исследование асинхронного электродвигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором	142
<i>Работа № 22.</i> Испытание асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами	147
<i>Работа № 23.</i> Улучшение коэффициента мощности установки с асинхронным электродвигателем трехфазного тока статическими конденсаторами	158
<i>Работа № 24.</i> Испытание синхронного генератора однофазного тока	164
<i>Работа № 25.</i> Исследование синхронного электродвигателя трехфазного тока	170

*Раздел 5***Коллекторные электрические машины**

<i>Работа № 26.</i> Испытание генератора постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения	177
<i>Работа № 27.</i> Испытание электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения	184
<i>Работа № 28.</i> Исследование параллельной работы генераторов постоянного тока параллельного возбуждения	192
<i>Работа № 29.</i> Исследование универсального электродвигателя последовательного возбуждения	200

*Раздел 6***Вращающиеся преобразователи**

<i>Работа № 30.</i> Испытание двигателя-генератора	205
<i>Работа № 31.</i> Исследование одноякорного преобразователя	209
<i>Работа № 32.</i> Исследование асинхронного преобразователя частоты	215

ЧАСТЬ III

ЭЛЕКТРОНИКА

Раздел 7

Электронные и ионные приборы

<i>Работа № 33.</i>	Исследование работы полупроводникового выпрямителя трехфазного тока	221
<i>Работа № 34.</i>	Испытание газотронного выпрямителя однофазного тока	229
<i>Работа № 35.</i>	Испытание ртутного выпрямителя трехфазного тока	235
<i>Работа № 36.</i>	Испытание управляемого тиратронного выпрямителя однофазного тока	243
<i>Работа № 37.</i>	Испытание электронного реле времени	248

ЧАСТЬ IV

ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Раздел 8

Электрический привод

<i>Работа № 38.</i>	Исследование механических характеристик асинхронной машины трехфазного тока с контактными кольцами в различных режимах	254
<i>Работа № 39.</i>	Исследование электропривода исполнительного механизма по системе генератор—двигатель	266
<i>Работа № 40.</i>	Исследование нагрева электрических машин при различных режимах работы	277
<i>Работа № 41.</i>	Экспериментальное определение мощности, потребной для привода вентилятора	291

Раздел 9

Электрическая аппаратура

<i>Работа № 42.</i>	Исследование реле максимального тока электромагнитной системы	298
<i>Работа № 43.</i>	Испытание магнитного пускателя с тепловым реле	304

Раздел 10

Основы электроавтоматики

<i>Работа № 44.</i>	Исследование и настройка схемы автоматического пуска асинхронного электродвигателя трехфазного тока с контактными кольцами	313
<i>Работа № 45.</i>	Исследование и настройка автоматической схемы управления, защиты, блокировки и сигнализации сложной транспортной установки	320

	Стр.
<i>Работа № 46.</i> Исследование опто-акустической сигнализационной схемы с подачей обратного сигнала	328
<i>Работа № 47.</i> Исследование свойств фотоэлектрического счетчика штучных грузов	330

Раздел 11

Трансформаторные подстанции и компенсация сдвига фаз

<i>Работа № 48.</i> Исследование режимов работы трансформаторов на понижительной подстанции трехфазного тока с определением средневзвешенного коэффициента мощности	336
<i>Работа № 49.</i> Влияние различных электроприемников заводской установки на коэффициент мощности предприятия и определение технико-экономического эффекта от его повышения	348

Раздел 12

Электрическое освещение

<i>Работа № 50.</i> Исследование электрических источников света с помощью фотоэлектрического люксметра	353
--	-----

ПРИЛОЖЕНИЯ

<i>Приложение 1.</i> Условные буквенные обозначения основных расчетных величин и единицы их измерения	363
<i>Приложение 2.</i> Условные графические обозначения в электрических схемах	366
<i>Приложение 3.</i> Форма бланка для выполнения лабораторной работы	386
<i>Приложение 4.</i> Правила для студентов, работающих в электротехнических лабораториях	390
<i>Приложение 5.</i> Графики выполнения лабораторных работ для различных специальностей вузов	392

8 руб. 85 коп.