

ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. А. ГЛЕБОВИЧ

ЛАБОРАТОРНЫЕ  
РАБОТЫ  
ПО ЭЛЕКТРО-  
ТЕХНИКЕ  
С ОСНОВАМИ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ



И. А. ГЛЕБОВИЧ

**А. А. ГЛЕБОВИЧ**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ  
РАБОТЫ  
ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ  
С ОСНОВАМИ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ**

**ИЗДАНИЕ 4-е, ПЕРЕРАБОТАННОЕ  
И ДОПОЛНЕННОЕ**

**Одобрено Ученым советом  
при Государственном комитете  
Совета Министров СССР  
по профессионально-  
техническому образованию  
в качестве учебного пособия  
для средних профессионально-  
технических училищ**



**МОСКВА „ВЫСШАЯ ШКОЛА“ 1976**

6П2.1  
Г53

Со всеми замечаниями и предложениями просим обращаться по адресу: *Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

**Глебович А. А.**

Г53      Лабораторные работы по электротехнике с основами промышленной электроники. Изд. 4-е, перераб. и доп. Учеб. пособие для средн. проф.-техн. училищ. М., «Высш. школа», 1976.

181 с. с ил.

Пособие содержит описание лабораторных работ, составленных по программе курса «Электротехника с основами промышленной электроники» для средних профессионально-технических училищ. В каждой лабораторной работе кратко изложен теоретический материал, приведен перечень необходимого оборудования и предложены вопросы для самопроверки.

В четвертом издании добавлены новые работы, учтены требования ГОСТ и ЕСКД.

Г  $\frac{30306-262}{052(01)-76}$  35—76

6П2.1

© Издательство «Высшая школа», 1976 г.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

В учебных программах для средних профессионально-технических училищ значительное внимание уделено лабораторным работам, которые помогают учащимся лучше усвоить пройденный материал, связать теорию с практикой, осуществить межпредметные связи и закрепить полученные знания.

Особое место в подготовке квалифицированных рабочих электроэнергетических профессий занимает изучение электротехники, поэтому правильная организация и методика проведения лабораторных работ по электротехнике и промышленной электронике имеет большое значение. Учащиеся на этих занятиях приобретают определенный комплекс практических навыков в эксплуатации электротехнического оборудования, сборке электрических цепей по приведенным схемам, включению различных электроизмерительных приборов и аппаратов и управлению их работой. Выполняя лабораторные работы по электротехнике, учащиеся имеют возможность в полной мере применить и те знания, которые получены ими при изучении других предметов. В первую очередь это относится к разделу «Электричество» курса физики, проходимого в 7-м классе, к разделу «Основы электродинамики» по программе 9-го класса и разделу «Колебания и волны» по программе 10-го класса, на которые отводится значительное количество часов.

Прежде чем приступить к проведению лабораторных работ по электротехнике с основами промышленной электроники, необходимо подготовить рабочие места в соответствии с количеством учащихся. Обычно рабочие места оборудуют из расчета на группу, состоящую из тридцати человек, чтобы двое-трое учащихся выполняли одинаковую работу. Рабочие места должны быть осна-



щены современным оборудованием, исправными электроизмерительными приборами и соединительными проводами. Электротехническая лаборатория должна надежно снабжаться электрической энергией постоянного и переменного тока достаточной мощности, стабильного напряжения и частоты.

В зависимости от условий, в которых находится училище, оборудуется одна отдельная или несколько лабораторий. Когда нет возможности оборудовать отдельную лабораторию, работы можно проводить в кабинете, предназначенном для теоретического обучения. Для этого изготовляют стенды, количество которых должно соответствовать числу работ, на которых монтируются схемы с приборами. Эти стенды крепят на стенах класса или устанавливают на столах, за которыми занимаются учащиеся.

В настоящее время Ленинградский опытный электротехнический завод Всесоюзного треста производственных предприятий при Государственном комитете Совета Министров СССР по профессионально-техническому образованию изготавливает лабораторные столы с комплектом оборудования для проведения работ по электротехнике. Такой стол обеспечивает выполнение двадцати четырех лабораторных работ, которые собраны на 6 платах; необходимые электроизделия скомплектованы в два набора. Кроме того, на каждом столе смонтирован барабан с комплектом электроизмерительных приборов. Все приборы разбиты на три группы. В первой группе имеются приборы постоянного тока (среднего габарита) в количестве четырех штук, во второй — переменного тока (среднего габарита) — шесть штук и в третьей — приборы постоянного и переменного тока (малого габарита) — десять штук. Набор приборов для работы производится поворотом барабана вокруг оси на  $120^\circ$ . В верхней части стола смонтирована панель питания, на которой размещены ручки управления и клеммы. Электрическая схема панели питания универсальная: на вход подается переменный трехфазный ток напряжением 220 В, а на выходе получают регулируемые напряжения постоянного и переменного тока. Нижняя часть стола служит для хранения оборудования. За каждым столом могут одновременно работать двое учащихся.

Наибольший эффект достигается при выполнении работы сразу после прохождения теоретического материа-

ла, когда свежий в памяти учащихся урок закрепляется лабораторной работой. Для всей группы содержание работ в этом случае одинаково, что требует большого количества однотипного оборудования. Если училище недостаточно оснащено оборудованием, лабораторные работы можно проводить в зависимости от имеющихся условий. При этом одновременно проводят различные по содержанию работы с наименьшим количеством потребного оборудования и приборов. Такая организация позволяет учащимся поочередно выполнить весь цикл работ.

График выполнения лабораторных работ составляет заместитель директора училища по учебно-производственной работе совместно с преподавателем электротехники. Все учащиеся должны быть заранее ознакомлены с этим графиком и последовательностью, с которой каждый из них будет выполнять ту или иную работу. Перед проведением лабораторной работы весь теоретический материал, относящийся к ней, должен быть повторен. В задании, выдаваемом на дом, рекомендуется указать, что именно необходимо повторить, а также следует ознакомить учащихся с содержанием очередной лабораторной работы.

Перед тем как приступить к проведению лабораторной работы, преподаватель должен проверить, все ли учащиеся смогут самостоятельно ее выполнить. Чтобы выяснить степень готовности учащихся, рекомендуется произвести опрос группы по тому материалу, на который дается работа. Если проводить опрос учащихся традиционным методом у доски или дать для всех контрольную работу, потребуется очень много времени, которым преподаватель и учащиеся не располагают. Поэтому степень готовности учащихся рекомендуется выяснять методом программированного контроля (машинного или безмашинного), применение которого позволяет в течение 15—20 мин провести фронтальный опрос всей группы.

В настоящее время в средних профессионально-технических училищах широко применяют различные по сложности методы программированного контроля, основой которых являются контрольно-тренировочные карты. Наиболее часто используют карты трех типов.

Первый тип карты представляет собой лист бумаги, разделенный пополам, на котором имеется 24 квадрата, по 12 на каждой половине. В левой части листа находят-

ся двенадцать занумерованных вопросов по теме. Двенадцать правильных ответов на эти вопросы, расположенные согласно определенным кодам, даны в правой части карты. Наличие пяти-шести кодов исключает возможность подсказывания для группы из 30 учащихся. Учащийся должен найти ответ на каждый вопрос и проставить в квадратах ответов соответствующий номер вопроса. Можно также на отдельном листе бумаги начертить двенадцать клеток и вписывать в них номера правильных ответов. При помощи шаблона преподаватель может в течение двух-трех минут проверить работу всей группы.

Карта второго типа относится к выборочному методу контроля и имеет пять вопросов. На каждый из пяти вопросов приведено пять ответов, из которых один правильный, а остальные неполные или неверные, но не абсурдные.

Карты этих типов применяют как при машинном, так и при безмашинном программировании с различным числом кодов.

Карта третьего типа снята на пленку и проектируется на экран через диапроектор. Эта карта разделена на три части: в левой и правой частях расположено по двенадцать одинаковых вопросов, но расположение их разное, а в центре находятся двенадцать правильных пронумерованных ответов. Левые вопросы предназначены для первого, а правые — для второго варианта (кода). Учащиеся, имея расчерченные на двенадцать клеток листы бумаги, проставляют в них номера ответов на вопросы по своему коду.

Карты, независимо от типа, делятся на поурочные, соответствующие одному или нескольким вопросам урока, и обзорные, включающие в себя вопросы по урокам целой темы.

Лабораторные работы рекомендуется проводить в последовательности, указанной в пособии. Однако некоторые из них по усмотрению преподавателя и в зависимости от конкретных условий можно выполнять в другом порядке или не выполнять вообще. Количество и содержание лабораторных работ может быть изменено по решению методической комиссии профессионально-технического училища, утвержденному руководством училища, в пределах общего количества часов, предусмотренных учебным планом.

## **ОБЩИЕ ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Учащиеся приступают к выполнению лабораторных работ только после изучения соответствующего раздела теоретического курса и выполняют их бригадами по два-три человека. Каждый член бригады обязан заблаговременно подготовиться к предстоящей работе, заготовить тетрадь, начертить в ней электрическую схему установки и таблицу измерений.

При выполнении лабораторной работы необходимо строго следовать правилам техники безопасности. При работе с проволочными резисторами и амперметрами учащиеся должны следить, чтобы сила протекающего тока не превышала допустимого значения.

Тахометры, секундомеры, гальванометры, термометры и другую специальную аппаратуру каждая бригада получает у дежурного и, окончив работу, сдает обратно. О порче прибора учащиеся должны сообщить руководителю.

Результаты измерений по каждому опыту учащиеся записывают в тетрадь и показывают преподавателю. После окончания работы схемы с разрешения преподавателя должны быть разобраны, приборы, оборудование и проводники убраны в шкафы, а стенды приведены в порядок.

На следующем занятии учащиеся должны представить отчет о выполненной работе, иначе они не будут допущены к дальнейшей работе. В заголовке отчета указывают номер работы и ее полное наименование. При составлении отчета нужно кратко описать цель работы, ее содержание, указать использованные аппаратуру и оборудование, приложить вычерченные на миллиметровой или клетчатой бумаге электрические схемы, таблицы и графики в соответствии с указаниями, помещенными в описании каждой работы в разделе «Содержание отчета».

### **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

При выполнении лабораторных работ следует соблюдать правила техники безопасности, чтобы избежать поражения электрическим током. Нельзя прикасаться к неизолированным проводам, соединительным зажимам и другим частям электрических цепей, находящимся под

напряжением. Прежде чем производить какие-либо изменения в схеме, ее нужно отключить от источника электрической энергии. Собранная схема должна быть проверена руководителем лабораторных занятий и только с его разрешения подключена к источнику электрической энергии. Без проверки преподавателем включать схему категорически запрещается.

При работе с цепями переменного тока, содержащими последовательно соединенные индуктивности и емкости, следует помнить, что напряжение в некоторых случаях может намного превышать напряжение источника питания. Нельзя размыкать вторичные обмотки трансформаторов тока, когда по первичным течет ток. Нельзя также размыкать цепи с катушками, имеющими большое число витков.

Следует соблюдать особую осторожность при работе с вращающимися агрегатами, особенно при измерении их скорости (частоты) вращения. Нельзя прикасаться к движущимся частям электрических машин даже при выключенном источнике энергии. Во избежание несчастных случаев одежда должна быть плотно облегающей; нельзя находиться в лаборатории в косынках, шарфах, галстуках. Если произойдет несчастный случай, электрическую установку следует немедленно отключить и оказать пострадавшему первую помощь.

Каждый учащийся обязан немедленно сообщить руководителю о замеченных неисправностях в работе оборудования и нарушениях правил техники безопасности. Инструктаж учащихся по технике безопасности должен быть зафиксирован в журнале, где каждый учащийся должен расписаться.



## ПОСТОЯННЫЙ ТОК

### Работа № 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА\*

Цель работы — научиться составлять простейшие электрические схемы, включать в цепь амперметр и вольтметр, измерять и вычислять электрическое сопротивление постоянному току в электрической цепи.

**Пояснения.** В замкнутой цепи постоянного тока при наличии источника электродвижущей силы протекает электрический ток, который определяют по закону Ома

$$I = \frac{E}{r},$$

где  $I$  — сила тока, А;  $E$  — э. д. с. источника постоянного тока, В;  $r$  — электрическое сопротивление постоянному току цепи, Ом.

Записав показания амперметра и вольтметра, включенных в схему (рис. 1), можно вычислить в омах электрическое сопротивление участка цепи

$$r = \frac{U}{I},$$

где  $U$  — напряжение, подводимое к участку измеряемой цепи, В;  $I$  — сила тока, А.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью, обозначается  $g$  и измеряется в сименсах

---

\* Эта работа может быть совмещена с работой по физике по определению удельного электрического сопротивления и может выполняться в кабинете физики.

(См). Между электрическим сопротивлением и проводимостью существует следующее соотношение

$$g = \frac{1}{r} = \frac{I}{U}.$$

Электрическое сопротивление проводника в омах и проводимость в сименсах можно вычислить, зная его удельное электрическое сопротивление  $\rho$  (Ом·м), геомет-

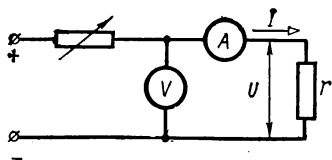


Рис. 1. Схема измерения электрического сопротивления методом амперметра и вольтметра:

A — амперметр, V — вольтметр,  
r — измеряемое электрическое сопротивление

рические размеры — длину  $l$  (м) и площадь поперечного сечения  $S$  (м<sup>2</sup>):

$$r = \rho \frac{l}{S} \quad \text{и} \quad g = \frac{S}{\rho l} = \frac{1}{r}.$$

Если площадь сечения проводника дана в мм<sup>2</sup>, его удельное сопротивление-следует брать в Ом·мм<sup>2</sup>/м.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр щитовой магнитоэлектрический на 1 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр щитовой магнитоэлектрический на 150 В . . . . .	1 »
Реостат проволочной 50 Ом, 1,5 А или панель с четырьмя последовательно включенными лампами накаливания 36 В, 150 Вт . . . . .	1 »
Реостат проволочной 100 Ом, 1,5 А . . . . .	1 »
Рубильник двухполюсный на 40 А . . . . .	1 »
Провода соединительные ШРПС площадью сечения 1,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м с наконечниками . . . . .	6 »
Источник постоянного тока напряжением 115 В	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и записать их технические данные, приведенные на шкале: название прибора, его условное обозначение и систему, тип, род тока (постоянный или переменный), пределы

измерения, класс точности, заводской номер и год выпуска.

2. Начертить электрическую схему включения приборов.

3. Собрать схему, проверив полярность зажимов источника тока и измерительных приборов, включить ее и измерить сопротивление по показаниям приборов (вольтметра и амперметра) при трех разных значениях силы тока, а показания записать в таблицу. Вычислить значения сопротивлений  $r_1, r_2, r_3$  и проводимостей  $g_1, g_2, g_3$  для каждого замера и подсчитать среднее арифметическое значение электрического сопротивления и проводимости по формулам

$$r_{\text{ср}} = \frac{r_1 + r_2 + r_3}{3}; \quad g_{\text{ср}} = \frac{1}{r_{\text{ср}}}.$$

4. Составить отчет.

Т а б л и ц а

**Результаты вычислений электрического сопротивления  
и проводимости**

№ опыта	Измерено		Вычислено	
	$I, A$	$U, B$	$r, Ом$	$g, См$
1				
2				
3				
Среднее значение				

### **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.

2. Параметры амперметра и вольтметра, данные источника постоянного тока (тип, напряжение, мощность) и реостатов (сопротивление, допустимая сила тока).

3. Электрическая схема включения электроизмерительных приборов для измерения электрического сопротивления.

4. Таблица с результатами вычислений электрического сопротивления, проводимостей и их средних значений.

5. Формула закона Ома для участка цепи.

## Контрольные вопросы

1. На основании какого закона по показаниям амперметра и вольтметра определяют электрическое сопротивление электрической цепи постоянному току?
2. В каких единицах измеряют силу тока, напряжение, электрическое сопротивление и проводимость?
3. Сформулируйте определение, что такое ампер, вольт, ом, сименс?
4. Что такое удельное электрическое сопротивление, как его обозначают и в каких единицах измеряют?
5. Что такое удельная проводимость, как ее обозначают и в каких единицах измеряют?
6. Влияет ли температура провода на его электрическое сопротивление и, если влияет, какова эта зависимость?
- 7\*. Как можно повысить точность измерения электрического сопротивления с помощью амперметра и вольтметра?
- 8\*. Какими другими приборами можно измерить электрическое сопротивление?

## Работа № 2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ И ПРОВЕРКА ПАДЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ В ОТДЕЛЬНЫХ ПРОВОДНИКАХ

Цель работы.—выполнить последовательное соединение проводников; определить падение напряжения в отдельных проводниках;

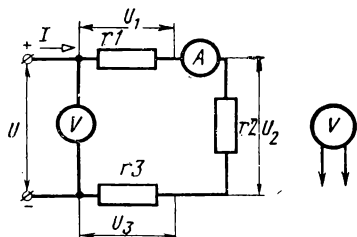


Рис. 1. Последовательное соединение реостатов с электрическими сопротивлениями  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$

отдельных проводниках, рассчитав его по закону Ома и замерив вольтметром; проверить второй закон Кирхгофа; результаты измерения сравнить с расчетными.

**Пояснения.** Соединение, при котором один и тот же ток проходит через все проводники и приемники электроэнергии, называется последовательным.

Сопротивление последовательной цепи (рис. 1) равно сумме сопротивлений отдельных приемников

$$r = r_1 + r_2 + r_3.$$

\* Здесь и далее на вопросы, отмеченные звездочкой, следует ответить, если учащийся изучил тему «Электронизмерительные приборы и электрические измерения».

Сила\* тока во всех приемниках, включенных последовательно, одинакова. Падение напряжения на каждом участке электрической цепи постоянного тока согласно закону Ома пропорционально его сопротивлению

$$U_1 = I r_1; \quad U_2 = I r_2; \quad U_3 = I r_3.$$

Общее напряжение, подключенное к последовательной цепи, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, равно сумме падений напряжений на отдельных участках

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

### Оборудование и аппаратура

Амперметр щитовой магнитоэлектрический на 5 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр щитовой магнитоэлектрический на 50 В . . . . .	1 »
Вольтметр щитовой магнитоэлектрический на 150 В . . . . .	1 »
Реостат проволочный на 10 Ом . . . . .	4 »
Провода соединительные ШРПС площадью сечения 1,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м с наконечниками	9 »
Источник постоянного тока напряжением 115 В	

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и схемой измерения напряжения.
2. Собрать схему, приведенную на рис. 1, включить ее в сеть и записать показания амперметра в таблицу при разных значениях силы тока.

Т а б л и ц а

Проверка законов Ома и Кирхгофа

Измерено			Вычислено		
сила тока цепи, А	напряжение сети, В	напряжение на отдельных проводниках, В	сопротивление проводников, Ом	общее сопротивление, Ом	падение напряжения, В

3. С помощью вольтметра измерить падение напряжения на каждом участке цепи и на входных зажимах цепи.

4. Вычислить сопротивление каждого проводника и общее сопротивление цепи.



5. Вычислить падение напряжения на участках цепи.
6. Сравнить результаты измерений и вычислений и убедиться, что сумма падений напряжений на участках цепи равна напряжению, подведенному к цепи.
7. Составить отчет.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Основные параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема.
4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Формула для определения общего сопротивления цепи.
6. Формула для определения падения напряжения.

### Контрольные вопросы

1. Определить падение напряжения на приемнике, сопротивление которого  $r$ , если через него проходит ток  $I$ .
2. Чему равно напряжение на входных зажимах последовательной цепи, если известно падение напряжения на ее отдельных элементах?
3. Чему равна сила тока в последовательной цепи, если известна сила тока в ее отдельных элементах?

### Работа № 3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ И ПРОВЕРКА ПЕРВОГО ЗАКОНА КИРХГОФА

Цель работы — выполнить параллельное соединение проводников; определить силу тока в отдельных проводниках и общую силу тока; убедиться в правильности первого закона Кирхгофа.

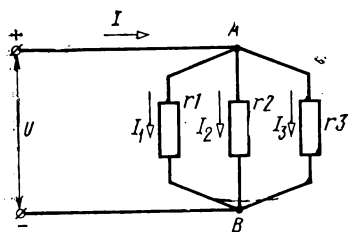


Рис. 1. Параллельное соединение резисторов с электрическими сопротивлениями  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$

**Пояснения.** Соединение, при котором все проводники подключены к одной и той же паре зажимов, называется параллельным (рис. 1). Если к общему зажиму присоединено более двух проводников, его называют узлом. На рис. 1 точки

$A$  и  $B$  являются узлами. Первый закон Кирхгофа гласит, что сумма токов, притекающих к данному узлу электрической цепи, равна сумме токов, вытекающих от него, т. е.

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

или алгебраическая сумма сил токов в узле электрической цепи равна нулю, т. е.

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

Напряжение на всех приемниках одинаково, так как их концы присоединены к одному и тому же напряжению

$$U = U_1 = U_2 = U_3.$$

Силу тока в отдельных ветвях определяют по закону Ома для участка цепи

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2}; \quad I_3 = \frac{U}{r_3}.$$

Как известно, величину, обратную сопротивлению, называют проводимостью цепи

$$\frac{1}{r} = g; \quad \frac{1}{r_1} = g_1; \quad \frac{1}{r_2} = g_2; \quad \frac{1}{r_3} = g_3.$$

По первому закону Кирхгофа сила тока в неразветвленной цепи

$$I = \frac{U}{r} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3}.$$

Разделим обе части равенства на  $U$  и получим:

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3,$$

т. е. общая проводимость цепи параллельно включенных приемников равна сумме проводимостей отдельных приемников.

Если сопротивления всех приемников одинаковы, т. е.

$$r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_n,$$

то

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_n} = \frac{n}{r_1}$$

где  $n$  — число отдельных сопротивлений.

Проводимость разветвления при равенстве между собой проводимостей всех параллельно включенных приемников электрической энергии

$$g = ng_1,$$

а сопротивление разветвления

$$r = \frac{r_1}{n}.$$

## Оборудование и аппаратура

Амперметр постоянного тока на 10 А . . . . .	1 шт.
Амперметр постоянного тока на 5 А . . . . .	3 »
Вольтметр постоянного тока на 150 В . . . . .	1 »
Реостат проволоочный на 60 Ом, 3 А . . . . .	3 »
Провода соединительные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м с наконечниками . . . . .	12 »
Рубильник двухполюсный на 40 А, 250 В . . . . .	1 »
Рубильник однополюсный на 25 А . . . . .	3 »
Источник постоянного тока напряжением 115 В,	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой измерения и приборами.
2. Собрать схему (рис. 2), подключить ее к сети, отрегулировать силу тока в цепи каждого сопротивления и записать показания вольтметра и всех амперметров в таблицу.
3. Убедиться в правильности первого закона Кирхгофа.
4. Вычислить сопротивление и проводимость каждого приемника и всей цепи и записать результаты в таблицу.
5. Составить отчет.

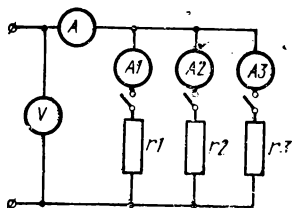


Рис. 2. Включение измерительных приборов для проверки первого закона Кирхгофа

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема (см. рис. 2).

4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Формула для определения общего сопротивления электрической цепи при параллельном соединении приемников.
6. Формула для определения проводимости отдельного приемника и общей проводимости электрической цепи при параллельном соединении приемников.
7. Формула первого закона Кирхгофа.

Т а б л и ц а

### Проверка первого закона Кирхгофа

Измерено					Вычислено							
$U, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$I, А$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$r_3, Ом$	$g_1, См$	$g_2, См$	$g_3, См$	$R, Ом$	$g, См$

### Контрольные вопросы

1. Чему равна сила тока в отдельной ветви цепи, если падение напряжения в ней равно  $U$ , а сопротивление  $r$ ?
2. Чему равна сила тока в неразветвленной электрической цепи, если известна сила тока в каждом сопротивлении, включенном параллельно?
3. Чему равно общее сопротивление  $r$  электрической цепи при параллельном соединении пяти приемников электрической энергии, если сопротивления их равны между собой?
4. Как определяют общее сопротивление электрической цепи при параллельном соединении приемников, если сопротивления их разные?
5. Чему равна общая проводимость десяти параллельно соединенных приемников, если сопротивление каждого из них равно  $r$ ?
6. Как распределяется ток по резисторам, соединенным параллельно, если известна общая сила тока  $I$  в цепи, число резисторов 4 и сопротивление каждого  $r$ ?

### Работа № 4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

Цель работы — ознакомиться с различными типами аккумуляторов; научиться составлять батареи аккумуляторов.

**Пояснения.** Аккумулятор является химическим источником тока и для того, чтобы он отдавал ток, его необходимо предварительно зарядить. Вследствие электрохими-

ческого процесса в аккумуляторе возникает электродвижущая сила (э. д. с.). Если к аккумулятору присоединить нагрузочный реостат, в цепи возникнет сила тока, равная по закону Ома для электрической цепи с э. д. с.

$$I = \frac{E}{R + r_0},$$

где  $R$  — сопротивление реостата нагрузки, Ом;  $r_0$  — внутреннее сопротивление одного аккумулятора, Ом;  $E$  — э. д. с. аккумулятора, В.

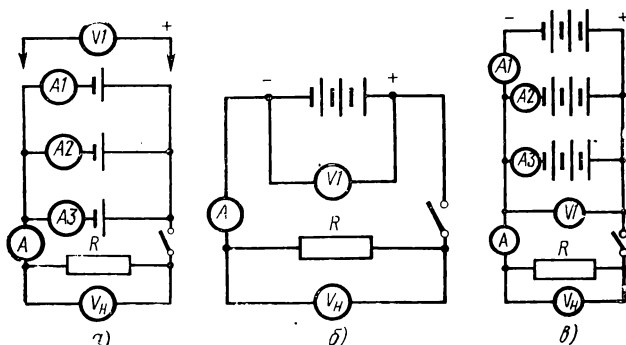


Рис. 1. Соединение аккумуляторов:

*а* — параллельное, *б* — последовательное, *в* — смешанное;  $V_1$  — вольтметр для измерения э. д. с. и напряжения на аккумуляторе,  $V_n$  — вольтметр для измерения напряжения на сопротивлении нагрузки,  $R$  — сопротивление нагрузки

Напряжение на сопротивлении реостата нагрузки

$$U = IR$$

меньше э. д. с. аккумулятора на величину  $Ir_0$ , называемую внутренним падением напряжения в аккумуляторе. Таким образом, напряжение на зажимах аккумулятора

$$U = E - Ir_0.$$

Емкость аккумулятора  $Q$  равна произведению разрядного тока на время разряда и определяется в ампер-часах (А·ч).

Если в цепи нагрузки хотят получить большую силу тока (большую, чем разрядный ток одного аккумулятора), аккумуляторы соединяют параллельно (рис. 1, *а*),



а если нужно получить большее напряжение (большее, чем напряжение одного аккумулятора), их соединяют последовательно (рис. 1, б). Когда необходимо увеличить и силу тока и напряжение, используют смешанное соединение (рис. 1, в).

При параллельном соединении аккумуляторов с одинаковыми э. д. с. э. д. с. всей батареи равна э. д. с. одного аккумулятора

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = \dots = E_m.$$

Внутреннее сопротивление батареи аккумуляторов, состоящей из  $m$  одинаковых аккумуляторных блоков, соединенных параллельно,

$$r = \frac{r_0}{m}.$$

При последовательном соединении  $n$  одинаковых аккумуляторов э. д. с. батареи равна сумме э. д. с. всех аккумуляторов

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = nE_1,$$

а внутреннее сопротивление такой батареи из  $n$  одинаковых элементов равно сумме внутренних сопротивлений этих аккумуляторов

$$r = r_{01} + r_{02} + r_{03} + \dots + r_{0n} = nr_0.$$

При смешанном соединении одинаковых аккумуляторов э. д. с. всей батареи

$$E = nE_1,$$

а внутреннее сопротивление батареи

$$r = \frac{nr_0}{m}.$$

## Оборудование и аппаратура

Амперметр постоянного тока на 10 А . . . . .	1 шт.
Амперметр постоянного тока на 3 А . . . . .	3 »
Вольтметр постоянного тока на 15 В . . . . .	2 »
Аккумуляторы щелочные 2НКН-45 . . . . .	9 »
Аккумулятор железоникелевый ЖН-25 . . . . .	1 »
Аккумулятор кислотный ЗСТЭ-64 . . . . .	1 »
Аккумулятор СК-1 или С-1 . . . . .	2 »
Реостат проволоочный на 10 А, 2,5 Ом . . . . .	1 »

Провода соединительные ШРПС площадью сечения 2,5 мм<sup>2</sup>, длиной 1,5 м . . . . . 15 шт.  
 Рубильник однополюсный на 25 А . . . . . 1 »  
 Источник постоянного тока для зарядки аккумуляторов — выпрямитель ВСА-5 на 127 или 220 В переменного тока, 0—32 В выпрямленного напряжения, максимальная сила выпрямленного тока 12 А

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой измерения.
2. Собрать схему (см. рис. 1, а) и записать показания приборов в таблицу при включенной нагрузке.

Т а б л и ц а

**Испытание аккумуляторов**

Соединение	Измерено												Вычислено			
	с нагрузочным сопротивлением								без нагрузочного сопротивления							
	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$U_H, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$I_H, А$	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$r, Ом$	$r_0, Ом$
Параллельное																
Последовательное																
Смешанное																

3. Отключить нагрузочный реостат и записать значение э. д. с. батареи и силу тока каждого аккумулятора.
4. Подсчитать по формуле внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи  $r$  и каждого аккумулятора  $r_0$  при параллельном соединении

$$r = \frac{E - U}{I}; \quad r_0 = rm.$$

5. Собрать схему (см. рис. 1, б) и записать показания приборов в таблицу при включенной нагрузке.
6. Отключить нагрузочный реостат и записать значение э. д. с. батареи и каждого аккумулятора.

7. Подсчитать внутреннее сопротивление батареи и каждого аккумулятора при последовательном соединении

$$r = \frac{E - U}{I}; \quad r_0 = \frac{r}{n}.$$

8. Собрать схему (см. рис. 1, в) и записать показания приборов в таблицу при включенной нагрузке.

9. Отключить нагрузочный реостат и записать показания приборов.

10. Подсчитать внутреннее сопротивление всей батареи при смешанном соединении аккумуляторов.

11. Составить отчет.

### **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.

2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.

3. Электрические схемы включения аккумуляторов.

4. Таблица с измеренными и вычисленными величинами.

5. Формулы для расчета э. д. с. батареи аккумуляторов при последовательном, параллельном и смешанном соединениях.

6. Формулы для расчета внутреннего сопротивления аккумулятора.

7. Формулы для расчета внутреннего сопротивления батареи аккумуляторов при последовательном, параллельном и смешанном соединениях.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое аккумулятор и какие типы аккумуляторов вы знаете?

2. Чему равна э. д. с. аккумулятора?

3. Как определить емкость аккумулятора и в каких единицах ее измеряют?

4. На какую величину отличается напряжение на аккумуляторе от его э. д. с.?

### **Работа № 5. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ И МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Цель работы — ознакомиться с методами измерения работы и мощности в цепи постоянного тока и научиться для этой цели правильно включать в цепь электроизмерительные приборы.

**Пояснения.** Если ламповый реостат с сопротивлением  $r$  находится под напряжением  $U$  и по нему проходит ток  $I$ , то за время  $t$  в нем выделяется энергия, которую можно подсчитать по формуле

$$W = IUt = \frac{U^2 t}{r} = I^2 r t.$$

Мощность — это работа (энергия), совершенная за единицу времени

$$P = \frac{W}{t} = IU = \frac{U^2}{r} = I^2 r.$$

За единицу работы принят 1 джоуль (Дж), а за единицу мощности — 1 ватт (Вт); 1000 Вт = 1 кВт. Измеряют мощность ваттметром. Для измерения мощности постоянного тока достаточно вольтметра и амперметра. Для измерения работы электрического тока применяют счетчик электрической энергии. Джоуль (ватт-секунда) — очень маленькая единица энергии; на практике счетчики измеряют работу в киловатт-часах — единицах в 3 600 000 раз больших, чем джоуль.

Работу электрического тока можно определить, измеряя мощность вольтметром и амперметром, а время — секундомером

$$W = Pt = IUt.$$

## Оборудование и аппаратура

Амперметр постоянного тока на 3 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр постоянного тока на 150 В . . . . .	1 »
Патроны с лампами накаливания 110 В, 100 Вт . . . . .	3 »
Провода соединительные ШРПС площадью сечения 1,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	9 »
Рубильник двухполюсный на 25 А, 250 В . . . .	1 »
Источник постоянного тока напряжением 115 В	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и схемами измерения (рис. 1).
2. Собрать схему (рис. 1, а), включить ее в сеть и записать показания приборов в таблицу.

## Измерение мощности и энергии в цепи постоянного тока

Соедине- ние	Измерено		Вычислено			
	$I$ , А	$U$ , В	$r$ , Ом	$P$ , Вт	$t$ , с	$W$ , Дж
Последо- вательное						
Парал- лельное						

3. Вычислить мощность и энергию (работу).

4. Собрать схему (рис. 1, б), включить ее в сеть и записать показания приборов в таблицу.

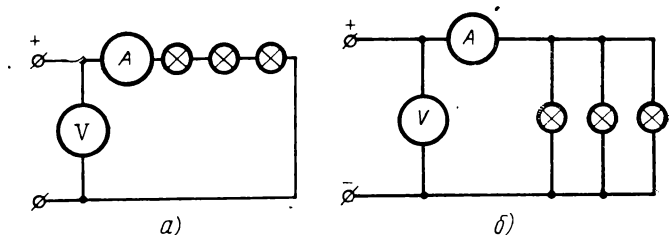


Рис. 1. Измерение мощности в цепи постоянного тока при включении потребителей:

а — последовательно, б — параллельно

5. Вычислить мощность и энергию.

6. Составить отчет.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов.
3. Электрические схемы измерения работы и мощности.
4. Таблица с измеренными и вычисленными величинами.
5. Формула для вычисления работы и мощности в цепи постоянного тока.



## Контрольные вопросы

1. Что такое работа и мощность в электрической цепи и в каких единицах их измеряют?
2. Какими приборами измеряют мощность постоянного тока?
3. Какими приборами и в каких единицах измеряют электрическую энергию?

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### Работа № 6. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОВОДНИКА И КАТУШКИ С ТОКОМ

Цель работы — ознакомиться с возникновением магнитного поля вокруг проводника, обтекаемого электрическим током; изучить распространение и направление магнитных силовых линий в зависимости от направления тока в прямолинейном проводнике и катушке.

**Пояснения.** Если по проводнику протекает электрический ток, вокруг него возникает магнитное поле. Это явление было открыто в 1820 г. В правильности этого положения можно убедиться на опыте, для чего необходимо иметь источник постоянного тока, прямолинейный проводник, расположенный вертикально, рубильник и компас. Когда рубильник разомкнут, стрелка компаса, поднесенного к проводнику, повернется по направлению юг — север. При замкнутом рубильнике по проводнику потечет постоянный ток, а вокруг него по правилу буравчика возникнет магнитное поле, о чем свидетельствует изменение положения стрелки компаса: она станет перпендикулярно оси проводника.

Если выключить рубильник, ток в проводнике и магнитное поле вокруг него исчезнут, а стрелка компаса вернется в первоначальное положение. Если направление тока в проводнике изменить на противоположное, изменится на противоположное и положение стрелки компаса. Магнитные силовые линии располагаются концентрически вокруг провода. Перемещение компаса вокруг проводника с током позволит определить направление магнитных силовых линий. Если проводник свернуть в катушку и пропустить по нему постоянный ток, то катушка создаст бо́льший магнитный поток, с северным и южным полюса-

ми. При изменении направления тока изменяется и полярность концов катушки.

Величину магнитного потока можно определить по закону Ома для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{Iw}{r_m},$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, вебер (Вб);  $Iw$  — намагничивающая сила, равная произведению силы тока на число витков катушки, А;  $r_m$  — магнитное сопротивление, характеризующее свойства окружающей среды больше или меньше пропускать магнитные силовые линии, А/Вб.

Эта формула, аналогичная формуле закона Ома для электрической цепи, позволяет понять основные зависимости между магнитным потоком  $\Phi$ , намагничивающей силой  $Iw$  и свойствами среды, в которой распространяется магнитный поток.

Если в катушку поместить стальной сердечник, то при той же силе тока магнитный поток возрастет в несколько десятков раз. Стальной сердечник изготавливают из ферромагнитных материалов, обладающих небольшим магнитным сопротивлением и тем самым позволяющим создавать сильные магнитные поля.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр постоянного тока на 5 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр постоянного тока на 10 В . . . . .	1 »
Резистор проволочный 1 Ом, 5 А . . . . .	1 »
Аккумулятор 5ЖН-45 . . . . .	1 бат.
Катушка индуктивности на 8 Ом . . . . .	1 шт.
Компас школьный . . . . .	1 »
Переключатель на два направления 25 А, 50 В . . . . .	1 »
Стальной сердечник . . . . .	1 »
Соединительные провода ШРПС площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	8 »

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием, измерительными приборами и схемой их включения.

2. Собрать схему (рис. 1, а). Не подключая проводник к аккумулятору, определить положение стрелки компаса. Замкнуть электрическую цепь и проверить положение стрелки компаса.

3. Изменить переключателем направление тока в электрической цепи и вновь проверить положение стрелки компаса при наличии тока в цепи. Сравнить положение стрелок. Отсоединить проводник от точек  $H$  и  $K$ .

4. В электрическую цепь (рис. 1, б) к зажимам  $H$  и  $K$  присоединить катушку  $L$  и повторить пп. 2 и 3.

5. Составить отчет.

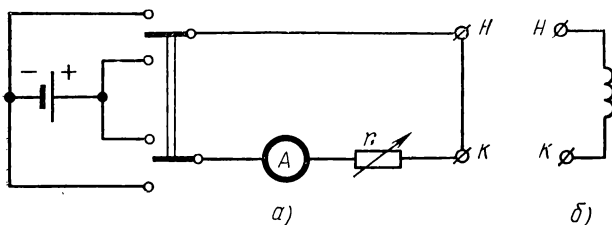


Рис. 1. Схемы для определения направления магнитных силовых линий:

$a$  — включение прямого проводника,  $б$  — включение катушки

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрические схемы.
4. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какая существует зависимость между током в проводнике или катушке и магнитным потоком?
2. В каких единицах измеряют намагничивающую силу и магнитный поток?
3. Как можно изменить полярность катушки?

## ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

### Работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ И ИНДУКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

Цель работы — ознакомиться с процессами, происходящими в простейших электрических цепях переменного тока, содержащих последовательно соединен-

ные активное и индуктивное сопротивления. Измерить общую силу тока, мощность и напряжение на отдельных участках цепи.

**Пояснения.** Если к резистору (активному сопротивлению) подключить синусоидальное напряжение, через него потечет синусоидальный ток, совпадающий по фазе с напряжением. Если к синусоидальному напряжению присоединить катушку индуктивности, через нее потечет синусоидальный ток, вектор которого отстает от вектора напряжения на угол  $\pi/2$  радиана ( $90^\circ$ ).

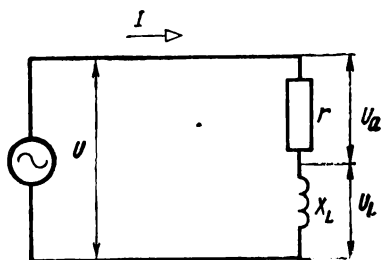


Рис. 1. Схема электрической цепи, содержащей последовательно включенные активное  $r$  и индуктивное  $x_L$  сопротивления

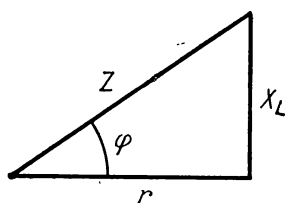


Рис. 2. Треугольник сопротивлений электрической цепи, содержащей последовательно включенные  $r$  и  $x_L$

При последовательном включении активного и индуктивного сопротивлений (рис. 1) общий ток, протекающий по цепи, определяется по закону Ома для цепи переменного тока по формуле

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U_a}{r} = \frac{U_L}{x_L},$$

где  $I$  — действующее значение переменного тока, А;  $U$  — действующее значение напряжения, В;  $U_a$  — напряжение на активном сопротивлении  $r$ , В;  $U_L$  — напряжение на индуктивном сопротивлении  $x_L$ , В;  $z$  — полное сопротивление электрической цепи, Ом;  $r$  — активное сопротивление, Ом;  $x_L$  — индуктивное сопротивление, Ом.

Полное электрическое сопротивление в омах для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений, находят из выражения

$$z = \sqrt{r^2 + x^2},$$

где  $r$  — активное сопротивление, Ом;  $x$  — индуктивное сопротивление Ом.

Значение полного сопротивления электрической цепи можно найти также при геометрическом построении прямоугольного треугольника (рис. 2), в котором два катета представляют активное  $r$  и индуктивное  $x$  сопротивления, а гипотенуза соответствует полному сопротивлению цепи  $z$ . Такое построение называют треугольником сопротивлений.

Вектор тока, протекающего через последовательно включенные активное и индуктивное сопротивления, от-

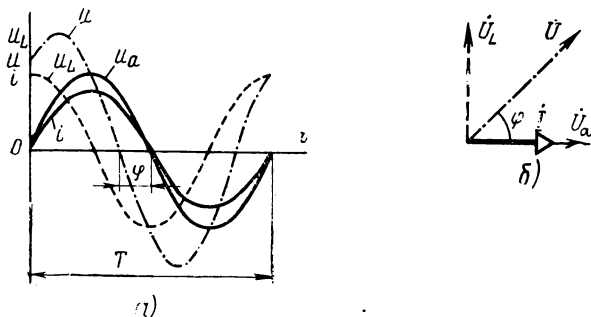


Рис. 3. Напряжение синусоидального переменного тока в электрической цепи, показанной на рис. 1:

$a$  — синусоидальные кривые мгновенных значений,  
 $b$  — векторная диаграмма

стает от вектора напряжения на угол  $\varphi$ , который зависит от соотношений между активным и индуктивным сопротивлениями и может быть определен из треугольника сопротивлений, как угол между гипотенузой  $z$  и катетом  $r$ .

Мгновенные значения общего напряжения  $u$ , подведенного к рассматриваемой цепи, силы тока  $i$ , напряжения на активном  $u_a$  и индуктивном  $u_L$  сопротивлениях, изменяющиеся синусоидально, показаны на рис. 3,  $a$ . На рис. 3,  $b$  показаны четыре вектора этих величин ( $\vec{U}$ ,  $\vec{I}$ ,  $\vec{U}_a$  и  $\vec{U}_L$ ).

Если сопротивление каждого элемента рассматриваемой цепи умножить на действующее значение силы тока, протекающего по цепи, можно получить значение действующего напряжения на каждом из них:

$$Ir = \dot{U}; \quad Ir = U_a; \quad Ix_L = U_L.$$

Тот же результат можно получить геометрически, если взять треугольник сопротивлений и каждую его сторону умножить на одну и ту же величину, пропорциональную силе тока. Построив новый треугольник с двумя катетами  $rI = \dot{U}_a$  и  $x_L I = \dot{U}_L$ , получим подобный треугольник, называемый треугольником напряжений (рис. 4).

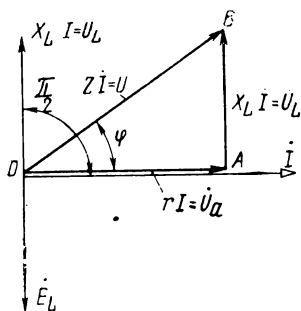


Рис. 4. Треугольник напряжений и векторная диаграмма, соответствующие схеме, показанной на рис. 1

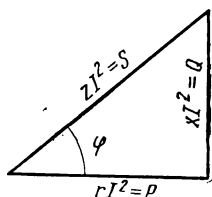


Рис. 5. Треугольник мощностей, соответствующий схеме, показанной на рис. 1

Так же от треугольника напряжений можно перейти к построению треугольника мощностей, умножив каждый вектор на силу тока (рис. 5).

Значение активной мощности можно получить, если умножить квадрат тока на сопротивление  $r$  или напряжение на силу тока и на коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ )

$$P = I^2 r = UI \cos \varphi.$$

Этот коэффициент мощности показывает, какая часть полной электрической мощности ( $S = UI$ ) превращается в активную мощность  $P$ , т. е.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

При синусоидальных токах и напряжениях коэффициент мощности определяют по углу  $\varphi$  — углу сдвига фаз между вектором напряжения и вектором тока. Угол  $\varphi$  может быть найден из треугольников сопротивлений, напряжений и мощностей. Коэффициент мощности в электрической цепи может быть также измерен прибо-

ром, называемым фазометром и показывающим в зависимости от градуировки либо угол  $\varphi$ , либо  $\cos \varphi$ .

Если в приемниках электрической энергии (электрические лампы накаливания, электрические нагревательные плитки и др.) отсутствуют магнитные и электрические поля (отсутствуют  $L$  и  $C$ ), коэффициент мощности такой цепи равен единице. Если же при протекании переменного тока в электрической цепи возникают магнитные или электрические поля (при наличии  $L$  или  $C$ ), коэффициент мощности становится меньше единицы. Когда коэффициент мощности равен нулю, электрический ток не совершает никакой активной работы, его активная мощность равна нулю, а электрический ток, протекающий по цепи, создает только электрическое или магнитное поле.

В электрической цепи, содержащей активное и индуктивное сопротивления, кроме полной и активной мощности имеется еще реактивная мощность, обозначаемая  $Q$ , определяемая расчетом

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 x,$$

графически — измерением катета  $Q$  из треугольника мощностей, или измерением специальным электроизмерительным прибором — ваттметром реактивной мощности, включаемым в электрическую цепь. Реактивную мощность измеряют в вольт-амперах реактивных, сокращенно обозначаемых вар.

Между полной, активной и реактивной мощностями, как это видно из рис. 5, существует такая же зависимость, как и между полным, активным и индуктивным сопротивлениями, т. е.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При проведении лабораторной работы учащиеся должны сравнить опытные, экспериментальные данные, полученные по показаниям электроизмерительных приборов, с расчетными.

### Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	•	1 шт.
Вольтметр переменного тока на 150 В . . . . .	3	»
Ваттметр однофазный на 127 В, 5 А . . . . .	1	»
Частотомер 45—50—55 Гц на 120 В . . . . .	1	»
Резистор проволочный 30 Ом, 3 А . . . . .	1	»
Катушка индуктивности (медный провод площадью сечения 1,5—2,5 мм <sup>2</sup> , число витков 3000, внутренний диаметр 100 мм) . . . . .	1	»

Рубильник двухполюсный на 25 А, 250 В . . . 1 шт.  
 Провода соединительные площадью сечения  
 2,5 мм<sup>2</sup>, длиной 1,5 м, многожильные . . . 10 »  
 Источник питания однофазный, переменного  
 тока, частотой 50 Гц, напряжением 127 В

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, показанную на рис. 6. Включить ее в сеть и измерить напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях при различной силе тока, протекающего по цепи. Результаты измерений записать в таблицу.

2. По результатам измерений вычислить  $r$ ,  $x_L$  и  $L$ .

3. По результатам вычислений построить треугольник сопротивлений  $r$ ,  $x_L$ ,  $z$  и найти угол  $\varphi$ .

4. Вычислить значение коэффициента мощности при различных токах в цепи.

5. Вычислить значения полной, активной и реактивной мощностей. Построить треугольник мощностей.

6. Составить отчет.

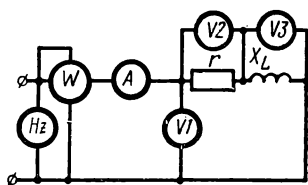


Рис. 6. Схема включения электроизмерительных приборов при исследовании электрической цепи, содержащей последовательно включенные активное и индуктивное сопротивления

Т а б л и ц а

Исследование цепи с последовательным соединением  
 активного и индуктивного сопротивлений

№ опыта	Показания приборов						Результаты вычислений								
	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$P$ , Вт	$I$ , А	$f$ , Гц	$z$ , Ом	$x_L$ , Ом	$r$ , Ом	$L$ , Г	$\varphi$ , рад	$\cos \varphi$	$S$ , В·А	$P$ , Вт	$Q$ , вар

П р и м е ч а н и е. Регулировать силу тока можно потенциометром, резистором или автотрансформатором в зависимости от имеющегося в лаборатории оборудования.



## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема.
4. Таблица с измеренными и вычисленными величинами.
5. Формулы для расчета полного, активного и индуктивного сопротивлений, полной, активной и реактивной мощностей и коэффициента мощности.
6. Треугольник сопротивлений и мощностей.

## Контрольные вопросы

1. Чему равно индуктивное сопротивление и в каких единицах его измеряют?
2. Чему равно мгновенное напряжение на индуктивности  $L$  и на активном сопротивлении  $r$ , если по ним протекает ток?
3. Чему равна угловая частота и в каких единицах ее измеряют?
4. Чему равны действующие значения синусоидальных токов и напряжений, если известны их амплитудные значения?
5. Что такое активная и реактивная мощности однофазной цепи переменного тока и в каких единицах их измеряют?
6. Чему равна полная мощность однофазной цепи переменного тока и в каких единицах ее измеряют?
7. Что такое коэффициент мощности?

## Работа № 8. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ И МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы — ознакомиться с приборами (счетчиком и ваттметром), применяемыми для учета электроэнергии и измерения мощности, потребляемой в цепи однофазного переменного тока, а также со схемами их включения.

**Пояснения.** Электрической энергией называется работа, выполняемая электрическим током в течение какого-либо отрезка времени. Электрическую энергию измеряют электрическим счетчиком и определяют как произведение электрической активной мощности  $P$  на время  $t$ :

$$W = Pt.$$

За единицу энергии принят один джоуль (Дж):  $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \times 1 \text{ с}$ . Джоуль очень маленькая единица, поэтому в практике пользуются единицей в 3 600 000 раз большей — 1 кВт·ч. В этом случае электрическую активную мощность  $P$  измеряют в киловаттах, а время  $t$  — в часах. 1 кВт·ч энергии равен 367 200 кгс·м, или 860 ккал.

Электрическая мощность определяется как работа, совершенная электрическим током в единицу времени, и за единицу ее принят  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/1 с}$ . При переменном однофазном токе полную электрическую мощность измеряют в вольт-амперах (В·А) и определяют по формуле

$$S = UI,$$

где  $U$  — действующее напряжение, В;  $I$  — действующая сила тока, А.

Активную электрическую мощность однофазного переменного синусоидального тока измеряют в ваттах (Вт) и определяют по формуле

$$P = IU \cos \varphi = I^2 r^*.$$

Если приемники электрической энергии создают магнитное или электрическое поле, как, например, электродвигатели, сварочные трансформаторы и другие подобные установки, то кроме активной мощности в этом случае к потребителю электрического тока подводится реактивная мощность, которую обозначают  $Q$ , измеряют в вольт-амперах реактивных (вар) и определяют по формуле

$$Q = IU \sin \varphi = I^2 x.$$

Если известны активная и реактивная мощности, подводимые к потребителям электрической энергии, можно определить полную мощность электрической цепи, представляющую собой их геометрическую сумму

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

---

\* См. учебник В. Е. Китаев, Л. С. Шляпинтох. Электротехника с основами промышленной электроники. М., 1973, стр. 126—129.

Полную электрическую мощность можно измерить при помощи вольтметра и амперметра. Измерять активную мощность в цепи однофазного переменного тока можно двумя методами: включением в цепь специального электроизмерительного прибора — ваттметра (рис. 1) или трех электроизмерительных приборов — вольтметра, амперметра и фазометра (рис. 2). Во втором случае мощность подсчитывают перемножением показаний всех трех приборов.

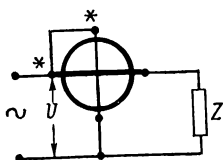


Рис. 1. Схема включения однофазного ваттметра

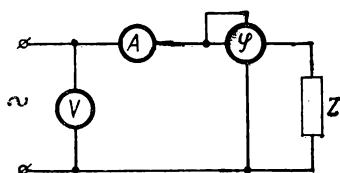


Рис. 2. Схема включения вольтметра, амперметра и фазометра для измерения мощности в цепи однофазного переменного тока

Ваттметр снабжен двумя катушками: токовой, включаемой последовательно с потребителями, по которой проходит весь измеряемый ток (точно так же, как по катушке амперметра), и напряжения с добавочным сопротивлением, которая включена так же, как вольтметр, т. е. показания ваттметра — это произведение трех величин: напряжения  $U$ , силы тока  $I$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . При подключении зажимов ваттметра к измеряемой цепи необходимо соединить начала и концы его обмоток в соответствии с направлением электрической энергии от генерирующей станции к потребителю. Начала (генераторные зажимы) ваттметров обозначают звездочкой. Если нарушить этот порядок, стрелка ваттметра будет отклоняться в противоположную сторону.

### Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр переменного тока на 150 В . . . . .	1 »
Однофазный фазометр на 127 В, 5 А . . . . .	1 »
Однофазный ваттметр на 127 В, 5 А . . . . .	1 »
Счетчик активной энергии однофазный СО на 127 В, 5 А . . . . .	1 »

Потенциометр на 250 Ом, 0,5 А . . . . .	1 шт.
Реостат регулировочный на 20 Ом, 4 А . . . . .	1 »
Панель с четырьмя потолочными патронами . . . . .	1 »
Лампы накаливания на 127 В, 150 Вт . . . . .	4 »
Рубильник двухполюсный на 127 В, 60 А . . . . .	1 »
Катушка индуктивности на 3 А . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	14 »
Источник переменного тока на 127 В, 50 Гц	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством счетчика и ваттметра и схемами их включения.

2. Включить измерительные приборы в соответствии со схемой, показанной на рис. 3.

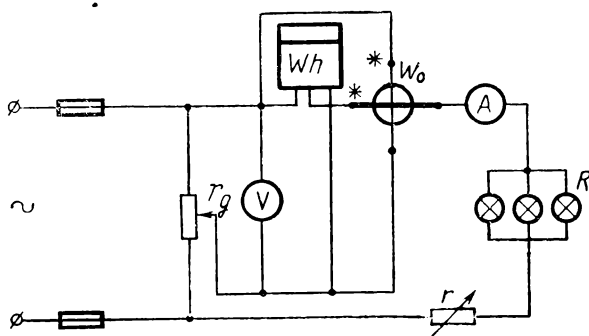


Рис. 3. Схема соединений приборов для измерения мощности и энергии в однофазной цепи переменного тока и для проверки электрических счетчиков:

$r_d$  — электрическое сопротивление делителя напряжения,  $W_h$  — проверяемый счетчик,  $W_o$  — образцовый ваттметр,  $R$  — сопротивление нагрузки (электрические лампы накаливания),  $r$  — регулировочный реостат

3. Измерить мощность, силу тока и напряжение. (Показания счетчика записывают в начале опыта и по истечении 10 мин. Нагрузка — чисто активная — лампа накаливания.) Результаты записать в таблицу. Измерения выполнить при различном количестве ламп.

4. Повторить испытания при нагрузке, состоящей из индуктивной катушки и активного сопротивления. Результаты испытаний записать в таблицу. Измерения выполнять при различных силах тока.

5. Собрать схему, показанную на рис. 2, на те же нагрузки и проверить потребляемую мощность с помощью трех приборов.

6. Составить отчет.

Т а б л и ц а

Измерение активной мощности и расхода электрической энергии  
в цепи однофазного тока

Нагрузка	$t, \text{с}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$S=UI, \text{В} \cdot \text{А}$	Показания счетчика			$\frac{P}{S} = \cos \varphi$
						$W_1, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	$W_2, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	$W = W_2 - W_1, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	
Активная									
Смешанная									

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры измерительных приборов и оборудования.
3. Схемы включения счетчика, ваттметра, амперметра и вольтметра для измерения мощности и электрической энергии.
4. Таблица с результатами измерения активной мощности и электрической энергии в цепи однофазного переменного тока.
5. Схема включения трех электроизмерительных приборов (амперметра, вольтметра и фазометра) для измерения мощности.
6. Выводы.

### Контрольные вопросы

- 1\*. Чем отличаются электроизмерительные приборы переменного тока от приборов постоянного тока?
- 2\*. Каково устройство и назначение электрического счетчика?
3. В каких единицах измеряют электрическую энергию?
4. Каково устройство и назначение ваттметра?
5. Что такое активная, полная и реактивная мощности переменного тока и в каких единицах их измеряют?

## **Работа № 9. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТОРА, КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ**

Цель работы — проверить закон Ома для неразветвленной цепи переменного тока, состоящей из последовательно включенных резистора, катушки индуктивности и конденсатора; ознакомиться с явлением резонанса напряжений и условиями, при которых он возникает.

**Пояснения.** При прохождении переменного тока через последовательно соединенные резистор (активное сопротивление), катушку (индуктивное сопротивление) и конденсатор (емкостное сопротивление) на каждом из этих элементов происходит падение напряжения. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с проходящим током и определяется по формуле

$$U_a = rI.$$

Напряжение на индуктивном сопротивлении опережает по фазе ток на  $\pi/2$  радиана и равно

$$U_L = x_L I,$$

где  $x_L = 2\pi fL = \omega L$  — реактивное индуктивное сопротивление катушки, Ом;  $f$  — частота переменного тока, Гц (1/с);  $L$  — индуктивность, Г (генри);  $\omega$  — угловая частота синусоидального переменного электрического тока, 1/с.

Напряжение на емкостном сопротивлении отстает по фазе от тока на  $\pi/2$  радиана и равно

$$U_C = x_C I,$$

где  $x_C = 1/(2\pi fC) \doteq 1/(\omega C)$  — реактивное емкостное сопротивление конденсатора, Ом;  $C$  — емкость конденсатора, Ф.

Мгновенные значения напряжений и тока, соответствующие электрической цепи, показанной на рис. 1, приведены на рис. 2.

Чтобы определить действующее напряжение на входе цепи и угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока, используем векторную диаграмму (рис. 3). Рассмотрим случай, когда  $x_L > x_C$  (рис. 3, а). Вектор напряжения на активном сопротивлении  $U_a$  совпадает по на-

правлению с вектором тока  $I$ . Вектор напряжения на индуктивном сопротивлении  $\vec{U}_L$  повернут по отношению к вектору тока на угол  $\pi/2$  радиана против движения часовой стрелки и опережает его на  $90^\circ$ . Вектор напряжения на конденсаторе  $\vec{U}_C$  повернут по отношению к вектору тока также на угол  $\pi/2$  радиана, но по движению

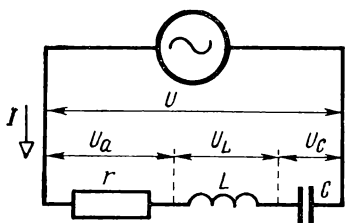


Рис. 1. Схема последовательного соединения резистора  $r$ , катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$

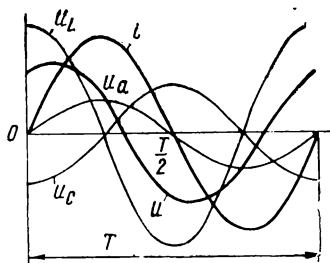


Рис. 2. Синусоидальные кривые мгновенных значений напряжений и силы тока при последовательном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора

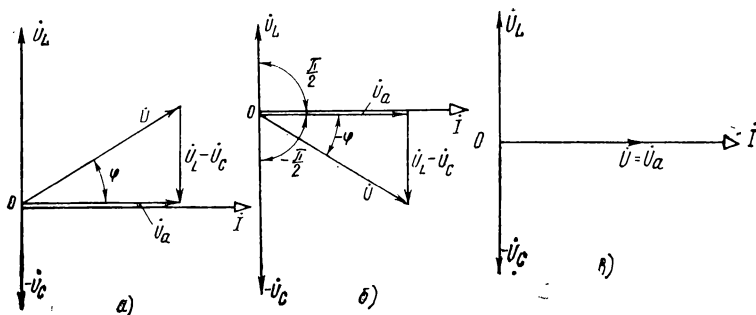


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений и силы тока в цепи с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора:

$a$  — при  $x_C < x_L$ ,  $б$  — при  $x_C > x_L$ ,  $в$  — при  $x_C = x_L$

часовой стрелки, и на рис. 3,  $a$  направлен вниз; поэтому дадим ему знак минус, противоположный знаку плюс у напряжения на индуктивности. Два вектора напряжения  $\vec{U}_L$  и  $\vec{U}_C$  противодействуют друг другу, и, если вольтмет-

ром замерить напряжение на этих двух сопротивлениях, получим их алгебраическую сумму  $\vec{U}_L + (-\vec{U}_C) = (\vec{U}_L - \vec{U}_C)$ . Так как  $x_L > x_C$  и вектор  $\vec{U}_L > \vec{U}_C$ , сумма этих двух векторов будет положительной и направлена вверх. Теперь сложим геометрически вектор  $(\vec{U}_L - \vec{U}_C)$  с вектором  $\vec{U}_a$  и получим гипотенузу прямоугольного треугольника  $\vec{U}$ , катеты которого равны  $\vec{U}_a$  и  $(\vec{U}_L - \vec{U}_C)$ .

Величину вектора напряжения  $\vec{U}$ , подведенного ко всей данной цепи, можно вычислить алгебраически, используя теорему Пифагора

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

На векторной диаграмме (рис. 3, а) видно, что вектор тока  $I$  отстает от вектора напряжения  $\vec{U}$ , подведенного ко всей электрической цепи, на угол  $\varphi$  — угол сдвига фаз.

На рис. 3, б приведена векторная диаграмма той же цепи, показанной на рис. 1, но для случая, когда  $x_L < x_C$ . Полное сопротивление электрической цепи, состоящей из последовательно включенных  $r$ ,  $x_L$  и  $x_C$ , определяют по формуле

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

а силу тока вычисляют по закону Ома для цепи переменного тока

$$I = \frac{U}{z}.$$

Если  $x_L = x_C$  (рис. 3, в), то разность  $x_L - x_C$  обращается в нуль и полное сопротивление  $z$  цепи становится равным активному сопротивлению  $r$  цепи. Векторы  $\vec{U}_C$  и  $\vec{U}_L$  равны по величине и взаимно компенсируют друг друга. Вектор  $\vec{U}$  сливается с вектором  $\vec{U}_a$ , т. е. входное напряжение цепи равно напряжению на активном сопротивлении и совпадает по фазе с током. Напряжения на индуктивности и емкости находятся в противофазе и равны друг другу по величине. Такое состояние цепи называют последовательным резонансом цепи, или резонансом напряжений. Для определения напряжений на реактивных элементах цепи при резонансе достаточно знать входное напряжение цепи и величины активных и



реактивных сопротивлений

$$U_C = x_C I = x_C \frac{U}{r} = \frac{1}{\omega C r} U;$$

$$U_L = x_L I = x_L \frac{U}{r} = \frac{\omega L}{r} U.$$

Зная напряжение и силу тока цепи при резонансе, можно определить величины активных и реактивных сопротивлений цепи и построить треугольник сопротивлений (рис. 4):

$$r = \frac{U_a}{I}; \quad x_C = \frac{U_C}{I}; \quad x_L = \frac{U_L}{I}.$$

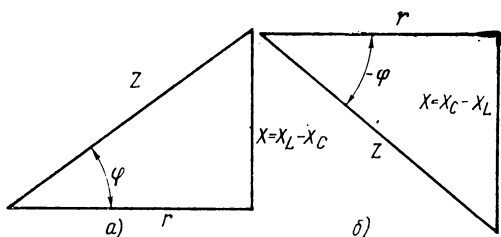


Рис. 4. Треугольники сопротивлений цепи с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора:

а — при  $x_L > x_C$ , б — при  $x_L < x_C$

Из приведенных формул видно, что чем меньше активное сопротивление цепи, тем выше напряжение на реактивных элементах; это напряжение может стать значительно выше напряжения  $U$ , подведенного ко всей цепи.

На основании равенства напряжений  $U_L$  и  $U_C$  при резонансе напряжений можно определить резонансную частоту цепи  $f_0$ . Так как  $x_L = x_C$ , то

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}; \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}; \quad \omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Активная мощность рассматриваемой электрической цепи

$$P = UI \cos \varphi = I^2 r.$$

## Реактивная мощность цепи

$$Q = UI \sin \varphi = x I^2 = (x_L - x_C) I^2 = x_L I^2 - x_C I^2 = Q_L - Q_C.$$

При резонансе напряжений ( $x_L = x_C$ ) реактивная мощность цепи равна нулю.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр переменного тока на 150 В . . . . .	5 »
Ваттметр однофазный на 127 В, 5 А, 50 Гц . . .	1 »
Автотрансформатор ЛАТР-2 на 120 В . . . . .	1 »
Дроссельная катушка на 5 А с железным подвижным сердечником . . . . .	1 »
Рубильник двухполюсный на 250 В, 60 А . . .	1 »
Конденсатор постоянной емкости на 80 мкФ, 400 В . . . . .	1 бат.
Резистор проволочный на 30 Ом, 4 А . . . . .	1 шт.
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . .	18 »
Источник переменного тока на 127 В, 50 Гц	

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 5), включить ее в сеть и записать показания приборов в таблицу.

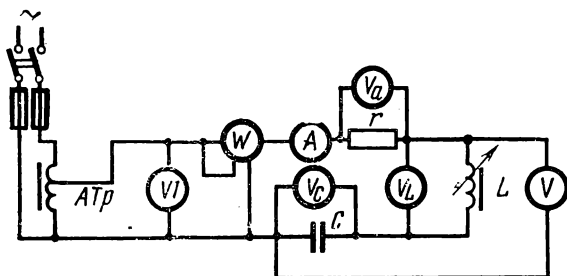


Рис. 5. Схема соединений измерительных приборов при исследовании резонанса напряжений

- По результатам измерений вычислить  $r$ ,  $x_L$ ,  $x_C$ ,  $\varphi$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $\cos \varphi$  и  $z$ .
- Построить треугольник сопротивлений и мощностей.
- Составить отчет.

Т а б л и ц а

**Исследование цепи с последовательным соединением  
резистора, индуктивной катушки и конденсатора.  
Резонанс напряжений**

№ опыта	Измерено						Вычислено							
	$I, A$	$U_1, B$	$U_2, B$	$U_L, B$	$U_{L+C}, B$	$U_C, B$	$P, Вт$	$r, Ом$	$x_L, Ом$	$X_C, Ом$	$\cos \varphi$	$Q, вар$	$S, В \cdot А$	$\varphi, рад$

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема.
4. Таблица с измеренными и вычисленными величинами.
5. Формулы для расчета активного, емкостного и индуктивного сопротивлений, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности.
6. Треугольник сопротивлений и мощностей.
7. Дать определение, при каких условиях возникает резонанс напряжений.

### Контрольные вопросы

1. Изобразите векторы напряжений на индуктивности и емкости.
2. Чему равно полное сопротивление цепи, состоящее из последовательно соединенных  $r$ ,  $L$  и  $C$ ?
3. Какой знак имеют емкостное и индуктивное сопротивления?
4. Что такое резонанс напряжений?
5. Чему равна резонансная частота, если известна индуктивность и емкость цепи?
6. Совпадает ли по фазе ток с напряжением сети при резонансе напряжений?
7. В каких случаях вектор тока в электрической цепи при последовательном соединении  $r$ ,  $L$  и  $C$  отстает от вектора напряжения сети и в каких случаях опережает его?
8. Чему равен коэффициент мощности при резонансе напряжений?
9. Какую опасность может создать резонанс напряжения?

## Работа № 10. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА И КАТУШКИ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Цель работы — ознакомиться с особенностями параллельного включения индуктивности (катушки) и емкости (конденсатора), а также с распределением токов в такой цепи и явлением резонанса токов.

**Пояснения.** При параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора получают разветвленную

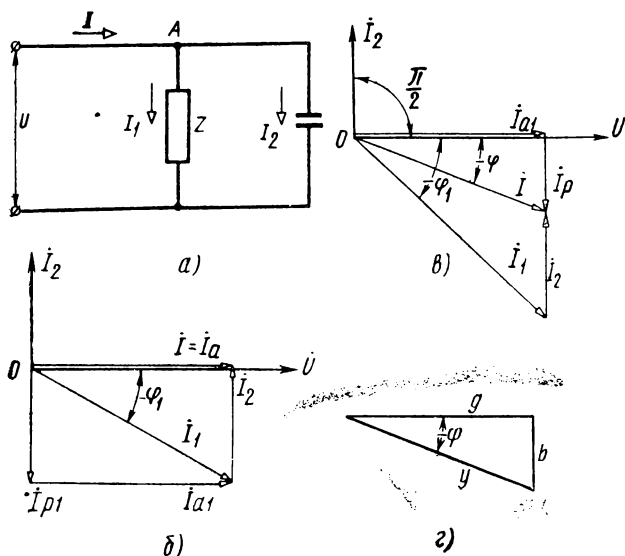


Рис. 1. Параллельное соединение катушки индуктивности и конденсатора:

*a* — схема соединения, *б* — векторная диаграмма при резонансе токов ( $I_{p1} = I_2$ ), *в* — векторная диаграмма при отсутствии резонанса ( $I_{p1} > I_2$ ), *г* — треугольник проводимости при  $x_L < x_C$

цепь (рис. 1, *a*). Силу тока, протекающего по катушке, определяют по формуле

$$I_1 = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}},$$

где  $U$  — напряжение сети, подведенное к сопротивлению,  $z$ , В;  $z$  — полное сопротивление катушки, Ом;  $r$  — актив-

ное сопротивление катушки, Ом;  $x_L$  — индуктивное сопротивление катушки, Ом.

Вектор тока  $I_1$  отстает от вектора напряжения  $U$  на угол  $-\varphi$  (рис. 1, б) и его можно разложить на два составляющих вектора: на активную составляющую  $I_{a1}$  и на реактивную составляющую  $I_{p1}$ , которые перпендикулярны друг другу

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}.$$

Вектор активной составляющей силы тока  $I_{a1}$  совпадает по фазе с вектором напряжения, а вектор реактивной составляющей силы тока  $I_{p1}$  отстает от вектора напряжения на угол  $\pi/2$  радиана.

Силу тока  $I_2$ , протекающего по цепи с конденсатором, определяют по формуле

$$I_2 = \frac{U}{x_C},$$

где  $x_C$  — реактивное, емкостное сопротивление конденсатора, Ом.

Ток, протекающий по цепи с конденсатором, опережает приложенное к нему напряжение на угол  $\pi/2$  радиана (рис. 1, б).

Общая сила тока  $I$ , идущая из сети к точке А (см. рис. 1, а), представляет собой геометрическую сумму двух токов

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Геометрическое построение для определения силы и фазы общего тока показано на рис. 1, в. Вектор общего тока  $\dot{I}$  отстает от вектора приложенного напряжения на угол  $-\varphi$ .

В данной цепи емкостный ток  $I_2$  меньше реактивной составляющей тока  $I_{p1}$ , поэтому общий ток имеет индуктивный характер, т. е. отстает по фазе от напряжения. Если бы индуктивный ток  $I_{p1}$  был меньше емкостного  $I_2$ , общий ток  $I$  имел бы емкостный характер и опережал по фазе напряжение.

Для расчета цепи переменного тока при параллельном соединении элементов цепи, содержащих активное и реактивное сопротивления, вместо сопротивлений следует пользоваться проводимостями, которые при парал-

тельном соединении складываются. В цепи переменного тока в отличие от цепи постоянного тока имеются три проводимости, равные обратным значениям сопротивлений: полная проводимость, обозначаемая  $y=1/z$ , активная проводимость  $g=r/z^2$  и реактивная проводимость  $b=x/z^2$ , которые могут быть изображены в виде треугольника проводимостей, показанного на рис. 1, г.

Когда в электрической цепи, состоящей из параллельно включенных индуктивного и емкостного сопротивлений, реактивные проводимости равны между собой, т. е.  $b_L=b_C$  [ $b_L=I_{p1}/U$ ;  $b_C=I_2/U$ ], ток в ветви с конденсатором становится равным индуктивной составляющей тока в катушке и наступает резонанс токов. В этом случае сила общего тока в неразветвленной цепи определяется активной проводимостью

$$I=Ug,$$

а вектор общего тока совпадает с вектором напряжения сети.

Активную проводимость  $g$  цепи переменного тока можно определить из треугольника проводимостей, приведенного на рисунке 1, г, если известны полная и реактивная проводимости:

$$g=\sqrt{y^2-b^2} \text{ или } g=r/(r^2+x^2)=I_a/U.$$

Следует иметь в виду, что сила тока, проходящего по цепи с параллельно включенными конденсаторами и катушкой, при резонансе токов может быть во много раз больше силы тока в неразветвленной цепи.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	3 шт.
Вольтметр переменного тока на 150 В . . . . .	1 »
Фазометр на 127 В, 5 А . . . . .	1 »
Конденсатор переменной емкости от 50 до 100 мкФ на 400 В . . . . .	1 »
Конденсатор постоянной емкости на 20 мкФ, 400 В . . . . .	2 »
Дроссельная катушка на 5 А . . . . .	1 »
Рубильник однополюсный на 60 А . . . . .	3 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	18 »
Источник переменного тока на 127 В, 50 Гц	

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 2), включить ее под напряжение и измерить силу тока и угол  $\varphi$  по показаниям приборов для различных емкостей конденсаторной батареи. Результаты измерений записать в таблицу.

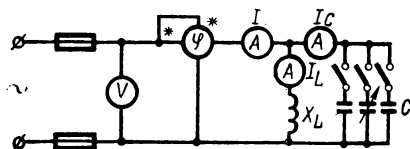


Рис. 2. Схема включения измерительных приборов при исследовании резонанса токов

Т а б л и ц а

### Исследование цепи с параллельным соединением индуктивности и емкости. Резонанс токов

№ опыта	$U$ , В	$I$ , А	$I_L$ , А	$I_C$ , А	$\varphi$ , рад	$\cos \varphi$	Указать, когда наступает резонанс токов

2. Довести емкость до величины, при которой  $\varphi=0$ . Записать в таблицу значения токов при резонансе.
3. Построить векторную диаграмму.
4. Составить отчет.

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема включения электроизмерительных приборов и параллельно соединенных катушки и конденсатора.
4. Таблица с результатами измерений.
5. Векторная диаграмма напряжения и силы токов при резонансе токов.

6. Формулировка закона Ома для участка электрической цепи переменного синусоидального тока, содержащей одно индуктивное сопротивление и одну емкость.

7. Условия, при которых наступает резонанс токов.

### Контрольные вопросы

1. Что такое индуктивное и емкостное сопротивления и в каких единицах их измеряют?

2. Что такое угол  $\varphi$  и как его вычисляют?

3. Как определяют силу суммарного тока в неразветвленной цепи переменного тока, если известна сила тока и его фаза в каждой параллельной ветви?

4. В каких случаях вектор тока совпадает с вектором напряжения, отстает от вектора напряжения и опережает его?

5. Что такое резонанс токов?

6. Какую опасность может представить резонанс токов?

### Работа № 11. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ И НАПЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕЗДОЙ И ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы — ознакомиться с трехфазными системами переменного тока и методами измерения фазных и линейных токов и напряжений; проверить основ-

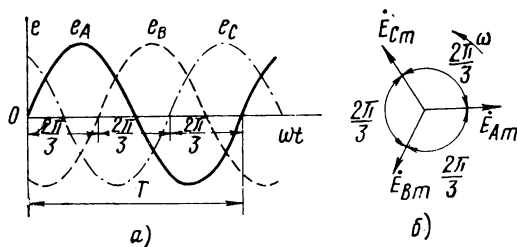


Рис. 1. Э. д. с. трехфазного генератора:

а — синусоидальные кривые мгновенных значений э. д. с. трех фаз (А, В и С), б — векторная диаграмма

ные соотношения между токами и напряжениями при соединении потребителей в звезду и треугольник; выяснить роль нулевого провода в четырехпроводной системе трехфазного тока.

**Пояснения.** Трехфазной системой называется совокупность трех электрических цепей, в которых действуют три одинаковые синусоидальные э. д. с., сдвинутые по фа-



зе на угол  $2\pi/3$  радиана (т. е. на  $1/3$  периода). На рис. 1, *а* показаны три синусоиды мгновенных значений э. д. с., а на рис. 1, *б* — три вектора этих э. д. с. трехфазной симметричной системы. При расположении векторов, показанных на рис. 1, *б*, в момент начала отсчета времени ( $t=0$ ) мгновенное значение э. д. с. в фазе *A* равно нулю (см. жирную кривую на рис. 1, *а*). В фазе *B* мгновенное значение э. д. с. в этот же момент времени равно  $-0,87$  его максимального значения  $E_m$  ( $0,87=\sqrt{3}/2$ ). В фазе *C* мгновенное значение напряжения в тот же момент време-

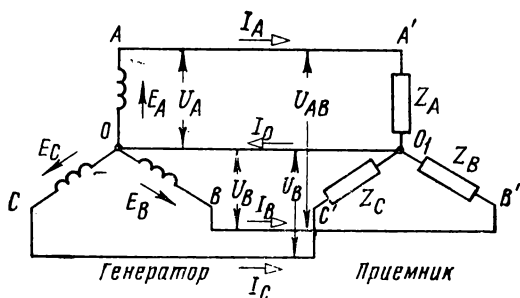


Рис. 2. Схема соединений трехфазного источника электрической энергии переменного тока с тремя приемниками, включенными в звезду по четырехпроводной системе с нулевой линией

ни равно  $+0,87 E_m$ . В симметричной трехфазной системе алгебраическая сумма мгновенных значений трех э. д. с. в любое мгновение времени равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

Трехфазная система, соединенная по схеме звезды (рис. 2), может иметь три провода, но чаще она имеет четыре провода: три линейных  $AA'$ ,  $BB'$  и  $CC'$ , по которым протекают линейные токи  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  и один нулевой или нейтральный провод  $OO'$ , по которому в любой момент времени протекает арифметическая сумма мгновенных значений токов трех фаз. При симметричной нагрузке, когда силы тока во всех трех фазах равны и имеют одинаковый угол сдвига друг относительно друга, ток в нулевом проводе отсутствует и трехфазная линия может иметь только три провода. При наличии однофазных потребителей тока обеспечить симметричную нагрузку труд-

но, поэтому соединение трехфазной системы в звезду осуществляют с помощью четырех проводов (четырёхпроводной трехфазной системой).

Трехфазная четырехпроводная система, например напряжением 380/220 В, позволяет одновременно присоединять к сети как трехфазные на 380 В, так и однофазные на 380 В или 220 В приемники энергии. Нулевой провод позволяет поддерживать у потребителей, рассчитанных на фазное напряжение, одинаковые напряжения в каждой фазе. При соединении в звезду  $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$ ;  $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$ .

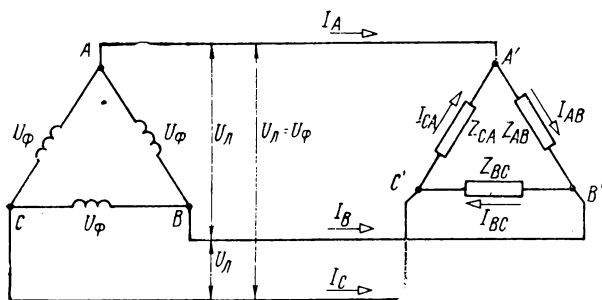


Рис. 3. Схема соединений трехфазного источника электрической энергии с тремя приемниками, включенными в треугольник

Если к трехфазной системе присоединены три различных по мощности и характеру потребителя тока, в каждой фазе и в каждом линейном проводе потекут токи разной силы с различным сдвигом фаз, а по нулевому проводу потечет ток, равный геометрической сумме токов трех фаз. Такая система называется несимметричной.

Однофазные приемники электроэнергии при получении питания от трехфазной системы, как и обмотки источников электрической энергии, могут быть соединены в треугольник. На рис. 3 показано соединение в треугольник обмоток трехфазного генератора  $AB$ ,  $BC$  и  $CA$  с тремя однофазными потребителями  $A'B'$ ,  $B'C'$  и  $C'A'$ . В этом случае линейные напряжения оказываются равными фазным напряжениям  $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}}$ , а линейные токи в  $\sqrt{3}$  раза больше (в 1,73 раза), чем токи в каждой из трех фаз при симметричной нагрузке. При таком соединении все однофазные потребители должны быть рассчитаны на номинальное линейное напряжение.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	3 шт.
Амперметр переменного тока на 3 А . . . . .	3 »
Вольтметр переменного тока на 150 В . . . . .	1 »
Панель с четырьмя потолочными патронами . .	3 »
Лампы накаливания на 220 В, 100 Вт . . . . .	9 »
Лампы накаливания на 127 В, 150 Вт . . . . .	9 »
Рубильник трехполюсный на 250 В, 60 А . . . .	1 »
Рубильник однополюсный на 250 В, 60 А . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . .	15 »
Источник трехфазного переменного тока с нулевым проводом на 220/127 В.	

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему соединений в звезду (рис. 4, а).
2. Включить три потребителя электрической энергии одинаковой мощности (по три лампы в каждой фазе по 150 Вт каждая, напряжением 127 В). Однополюсный

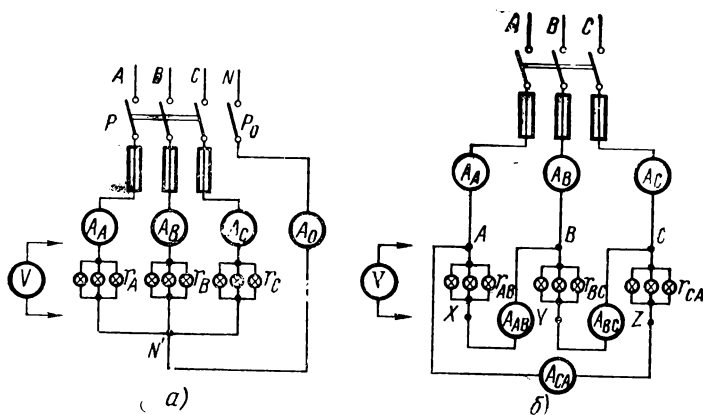


Рис. 4. Схемы включения измерительных приборов для исследования цепи трехфазного тока:

а — при соединении в звезду, б — при соединении в треугольник

рубильник в нулевом проводе должен быть включен. Замерить токи во всех четырех проводах и напряжение каждой фазы. Записать результаты измерения в табл.1. Проверить соотношение между линейными и фазными напряжениями и токами.

Таблица 1

**Испытание приемников электрической энергии,  
соединенных в звезду**

Режим нагрузки	Токи нагрузки, А				Напряжения, В					
					фазные			линейные		
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$
Нулевой провод включен, нагрузка симметричная										
Нулевой провод выключен, нагрузка симметричная										
Нулевой провод включен, нагрузка не- симметричная										
Нулевой провод выключен, нагрузка несимметричная										

3. Произвести те же измерения токов и напряжений, включив в нулевом проводе рубильник  $P_0$ .

4. При включенном рубильнике  $P_0$  в нулевом проводе изменить нагрузку в трех фазах, чтобы в каждой фазе была разная нагрузка (разная суммарная мощность электрических ламп; в фазе  $A$ —4 лампы на 127 В по 150 Вт; в фазе  $B$ —две лампы на 150 Вт; в фазу  $C$  лампы не включать). Измерить токи и напряжения в каждой фазе и между фазами. Результаты записать в табл. 1.

5. Выключить рубильник в нулевом проводе и вновь измерить напряжение и токи. Результаты записать в табл. 1.

6. Выяснить влияние нулевого провода на работу трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузках.

7. Составить отчет по результатам испытания потребителей, соединенных по схеме звезды.

8. Собрать схему соединений в треугольник (рис. 4, б).

9. На каждую фазу включить электрические лампы одинаковой суммарной мощности, измерить токи и напряжения во всех трех фазах и в трех линейных проводах. Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

**Испытание приемников электрической энергии,  
соединенных в треугольник**

Режим нагрузки	Точки нагрузки, А						Напряжения, В		
	линейные			фазные					
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$
Нагрузка симметричная									
Нагрузка несимметричная									

10. Включить на фазы несимметричную нагрузку. Результаты измерений записать в табл. 2.

11. Сравнить показания вольтметра, измеряющих линейные и фазные напряжения при соединении в треугольник, с симметричной и несимметричной нагрузками.

12. Составить отчет по результатам испытаний схемы с потребителями, включенными в треугольник.

13. Сравнить схемы включения в звезду и треугольник при симметричной и несимметричной нагрузках.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.

2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.

3. Схема включения измерительных приборов (четырех амперметров и одного вольтметра) при соединении приемников электрической энергии в звезду с выведенной нулевой точкой (см. рис. 4, а).

4. Табл. 1 с результатами измерений токов в линейных (фазных) проводах и в нулевом проводе, а также

линейных и фазных напряжений при соединении приемников в звезду.

5. Вывод о значении нулевого провода для приемников электроэнергии, соединенных в звезду, при симметричной и несимметричной нагрузках.

6. Схема включений измерительных приборов (шести амперметров и одного вольтметра) при соединении приемников электроэнергии в треугольник (см. рис. 4, б).

7. Табл. 2 с результатами измерений линейных и фазных токов и напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках.

8. Выводы по работе в целом. (Указать, какие преимущества и недостатки имеют схемы соединений приемников электрической энергии в звезду с выведенной нулевой точкой и четвертым — нулевым проводом и без выведенной нулевой точки, а также при соединении в треугольник.)

### **Контрольные вопросы**

1. Какое соединение однофазных потребителей электрической энергии называют звездой?

2. Во сколько раз линейное напряжение больше фазного при соединении в звезду с выведенной нулевой точкой?

3. Как определить силу тока в нулевом проводе, если известна сила тока в каждом фазном проводе?

4. Для чего применяют нулевой провод в четырехпроводной трехфазной системе?

5. Какое соединение называют треугольником и какое соотношение существует между линейными и фазными напряжениями?

6. Во сколько раз линейный ток больше фазного тока при соединении треугольником?

7. Как изменится напряжение на зажимах приемника электрической энергии, соединенного в звезду с выведенной нулевой точкой, при обрыве нулевого провода при симметричной и несимметричной нагрузках?

### **Работа № 12. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Цель работы — ознакомиться с методами измерения и приборами, предназначенными для измерения активной мощности и коэффициента мощности в цепи трехфазного тока.

**Пояснения.** Активную мощность трехфазного тока можно измерить несколькими способами.

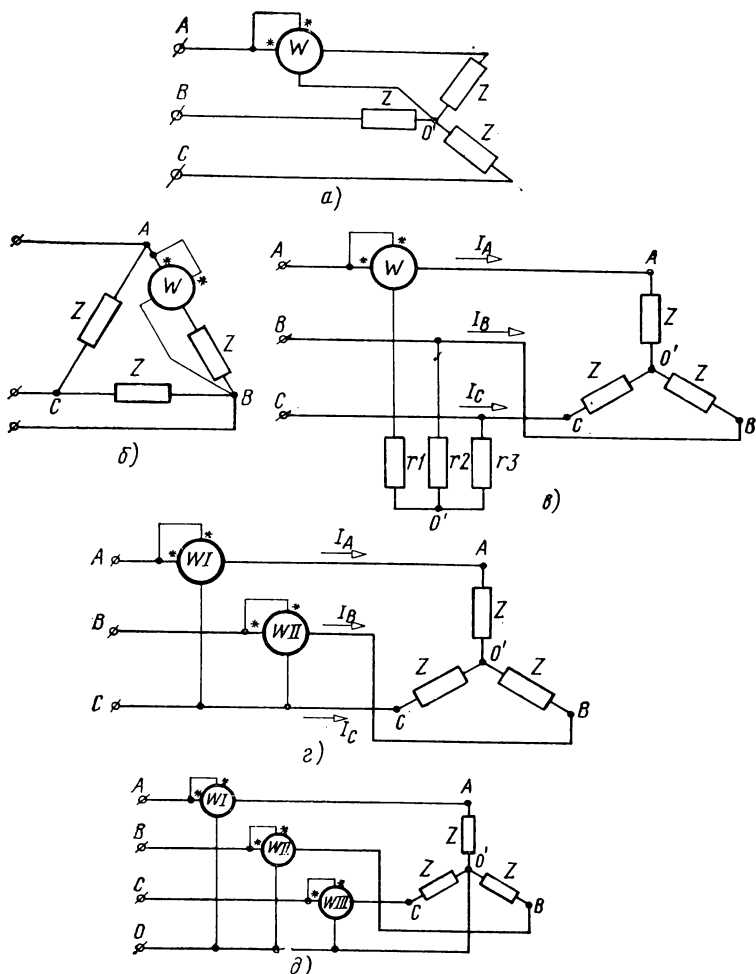


Рис. 1. Схемы измерения активной мощности трехфазного тока при симметричной и несимметричной нагрузках:

*a* — одним однофазным ваттметром при симметричной нагрузке, соединенной в звезду с выведенной нулевой точкой, *б* — одним однофазным ваттметром при симметричной нагрузке, соединенной в треугольник, *в* — одним однофазным ваттметром при симметричной нагрузке, соединенной в треугольник или звезду без выведенной нулевой точки, с искусственной нулевой точкой, *г* — двумя однофазными ваттметрами при трехпроводной системе с симметричной и несимметричной нагрузками, *д* — тремя однофазными ваттметрами при четырехпроводной системе для симметричной и несимметричной нагрузок

Если мощности всех трех фаз равны друг другу, то измерив мощность одной фазы  $P_{\phi}$  (рис. 1, а, б, в) и умножив показания ваттметра на три, получим мощность трехфазной цепи

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi.$$

В сети трехфазного тока при отсутствии нулевой линии полную мощность можно измерить двумя однофаз-

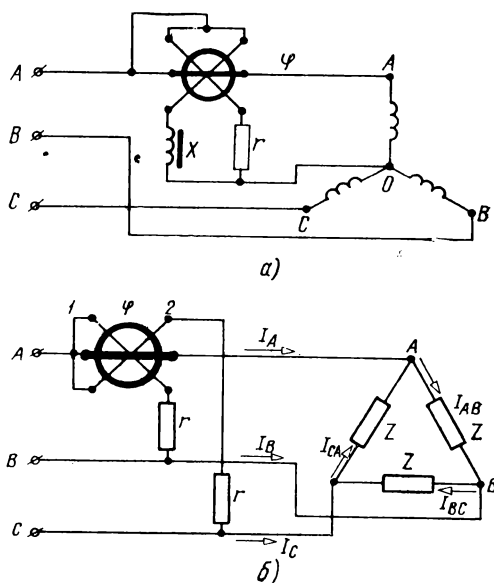


Рис. 2. Схемы включения фазометров в цепь трехфазного тока:

а — однофазного электродинамического при симметричной нагрузке с нулевым проводом, б — трехфазного с симметричной нагрузкой без нулевого провода

ными ваттметрами (рис. 1, г) и в этом случае она представляет собой алгебраическую сумму показаний двух ваттметров

$$P = P_I + P_{II}.$$

Если мощности отдельных фаз неодинаковы при четырехпроводной системе, пользуются тремя однофазными ваттметрами (рис. 1, д), а для определения суммарной мощности трехфазной системы складывают их по-



казания

$$P = P_I + P_{II} + P_{III}.$$

Промышленность выпускает специальные ваттметры трехфазного тока, представляющие собой совокупность движущих элементов двух или трех ваттметров, заключенных в общий кожух и действующих на одну стрелку, которая на шкале прибора показывает общую мощность трехфазного тока.

Для измерения коэффициента мощности  $\cos \varphi$  в цепи трехфазного переменного тока применяют специальные приборы — фазометры, имеющие подобно ваттметрам цепи напряжения и цепи тока и включаемые по специальным схемам (рис. 2). Фазометр — прибор непосредственного отсчета  $\cos \varphi$  или угла  $\varphi$ .

Коэффициент мощности может быть также вычислен по показаниям трехфазного ваттметра  $P$ , амперметра  $I_\Phi$  и вольтметра  $U_\Phi$

$$\cos \varphi = \frac{P}{3U_\Phi I_\Phi}.$$

### Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	3 шт.
Вольтметр переменного тока на 150 В . . . . .	3 »
Ваттметр однофазный переменного тока	
Д341/2 на 127 В, 5 А . . . . .	3 »
Катушка индуктивности . . . . .	3 »
Панель с четырьмя потолочными патронами .	3 »
Лампы накаливания на 127 В, 150 Вт . . . . .	12 »
Электродвигатель трехфазного тока 4А90ЛА мощностью 1,5 кВт на 127/220 В, 960 об/мин	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	18 »
Источник переменного тока на 127/220 В, 50 Гц	

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (рис. 3, а), установить симметричную нагрузку на каждую фазу и измерить ваттметром мощность при симметричной нагрузке. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 1.

2. Собрать схему (рис. 3, б) с той же симметричной нагрузкой, что и в п. 1 (рубильник  $P_0$  выключен) и измерить мощность. Результаты измерений и вычислений за-

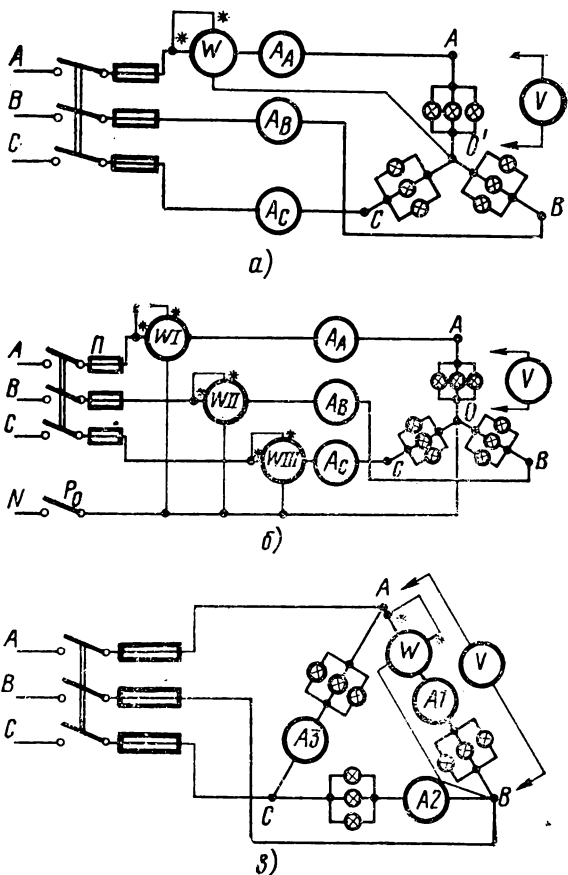


Рис. 3. Схемы включения приборов для измерения силы тока, напряжения и мощности в трех-  
фазных системах:

*а* — одним однофазным ваттметром при соединении в звезду с выведенной нулевой точкой, *б* — тремя однофазными ваттметрами при соединении в звезду с выведенной нулевой точкой, *в* — одним однофазным ваттметром при соединении в треугольник

писать в табл. 2 и сравнить с данными предыдущих замеров по табл. 1.

3. Установить разные нагрузки на каждую фазу и измерить мощность с помощью трех ваттметров при включенном рубильнике  $P_0$ . Результаты измерений записать в табл. 2. Сравнить показания ваттметров и сум-

марную мощность при включенном и выключенном рубильнике  $P_0$ .

Таблица 1

Измерение мощности в трехфазной системе однофазным ваттметром при симметричной нагрузке, включенной в звезду

№ опыта	Измерено									Вычислено	
	напряжение, В						ток, А			$P_\phi$ , Вт	$P=3P_\phi$ , Вт
	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{AO}$	$U_{BO}$	$U_{CO}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$		$\cos \varphi$

Таблица 2

Измерение мощности в трехфазной системе тремя однофазными ваттметрами при симметричной и несимметричной нагрузках, включенных в звезду

Режим нагрузки	Напряжение, В						Ток, А			Мощность, Вт			
	$U_{AB}$	$U_{AC}$	$U_{BC}$	$U_{AO}$	$U_{BO}$	$U_{CO}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_I$	$P_{II}$	$P_{III}$	$P$
Симметричная, $P_0$ выключен													
Симметричная, $P_0$ включен													
Несимметричная, $P_0$ выключен													
Несимметричная, $P_0$ включен													

4. Собрать схему с двумя ваттметрами (см. рис. 1, 2), включив дополнительно по одному амперметру в каждую фазу, и измерить мощность, результаты измерений и вычислений записать в табл. 3.

Таблица 3

Измерение мощности в трехфазной системе двумя однофазными ваттметрами с нагрузкой, включенной в звезду

№ опыта	Напряжение, В				Ток, А			Мощность, Вт			$\cos \varphi$
	$U_{AB}$	$U_{AO}$	$U_{BO}$	$U_{CO}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_I$	$P_{II}$	$P$	

5. Собрать схему с одним трехфазным двухэлементным ваттметром (см. рис. 1, г) и измерить мощность при той же нагрузке, что и в п. 4. Результаты измерений записать в табл. 4 и сравнить их с результатами измерений и вычислений по п. 4 (см. табл. 3).

Таблица 4

Измерение мощности в трехфазной системе трехфазным двухэлементным ваттметром с нагрузкой, включенной в звезду

№ опыта	Напряжение, В			Ток, А			$P$ , Вт	$\cos \varphi$	Примечание
	$U_{AB}$	$U_{AC}$	$U_{BC}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$			

6. Собрать схему соединения потребителей в треугольник (рис. 3, в), установить одинаковые нагрузки в каждой фазе, измерить мощность в одной фазе и вычислить мощность трехфазной системы при помощи одного ваттметра. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 5.

7. Составить отчет.

Таблица 5

Измерение мощности в трехфазной системе однофазным ваттметром при симметричной нагрузке, включенной в треугольник

№ опыта	Напряжение В			Ток, А			Мощность Вт		$\cos \varphi$	Примечание
	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$P_{\phi}$	$P=3P_{\phi}$		

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Схема включения однофазного ваттметра, трех амперметров и вольтметра для измерения мощности трехфазного тока при соединении в звезду симметричной нагрузки (см. рис. 3, а); табл. 1 с результатами измерений и вычислений мощности по этой схеме и необходимые формулы.
4. Схема включения трех одинаковых ваттметров, трех амперметров и трех вольтметров для измерения мощности в трехфазной четырехпроводной системе при соединении симметричной и несимметричной нагрузок в звезду с выведенной нулевой точкой (см. рис. 3, б); табл. 2 с результатами измерений и вычислений и необходимые формулы.
5. Сравнить результаты измерений по схеме с одним однофазным ваттметром и по схеме с тремя однофазными ваттметрами при симметричной и несимметричной нагрузках, включенных в звезду с выведенной нулевой точкой и соединенной с нулевым проводом.
6. Вывод о влиянии нулевого провода на мощность в каждой фазе при симметричной и несимметричной нагрузках.
7. Схема включения электроизмерительных приборов для измерения мощности трехфазного тока двумя однофазными ваттметрами при соединении приемников в звезду без выведенной нулевой точки (см. рис. 1, г). Табл. 3 с результатами измерений и вычислений и формула для вычисления мощности в трехфазной цепи по данной схеме.
8. Схема включения одного трехфазного двухэлементного ваттметра (см. рис. 1, г). Табл. 4 с результатами измерений и вычислений.
9. Выводы о результатах сравнения показаний ваттметров по табл. 3 и 4 при одинаковой нагрузке и напряжениях.
10. Схема соединения электроизмерительных приборов для измерения ваттметром мощности симметричного потребителя, соединенного в треугольник (см. рис. 3, б). Табл. 5 с результатами измерений и вычис-

лений и формула для вычислений мощности в трехфазной цепи по данной схеме.

11. Выводы о работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие приборы применяют для измерения активной мощности в цепи трехфазного тока?

2. Какие приборы применяют для измерения коэффициента мощности и частоты переменного тока?

3. Как определяют полную и активную мощность в трехфазной цепи?

4\*. Как устроен трехфазный двухэлементный ваттметр?

5. Какие схемы включения ваттметров применяют для измерения активной мощности в трехфазной системе при симметричной нагрузке во всех трех фазах?

## **ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

### **Работа № 13. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МОСТОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

Цель работы — ознакомиться с устройством универсального моста. Усвоить метод измерения электрических сопротивлений проводников с помощью измерительного моста.

**Пояснения.** Как известно, сопротивление можно измерить вольтметром и амперметром, вычислив его по закону Ома. Однако этот метод имеет недостатки, так как, во-первых, точность измерения существенно понижается из-за влияния погрешностей двух приборов, а во-вторых, для разных значений сопротивления требуются измерительные приборы на различные пределы измерения. Измерительный мост является прибором сравнения, посредством которого измеряемое сопротивление сопоставляется с образцовым и состоит из трех известных сопротивлений, образующих плечи моста, и высокочувствительного прибора, называемого нульиндикатором (гальванометр). Мост позволяет измерять сопротивления от сотых долей ома до мегома и более.

Широко распространен универсальный мост типа УМВ, которым можно измерять сопротивления от 0,1 до 1 000 000 Ом (рис. 1). Погрешность измерения при правильно выбранном соотношении плеч  $r_1$  и  $r_2$  и соот-

ветствующем напряжении батареи, питающем мост, для сопротивлений от 1 до 100 000 Ом не превышает  $\pm 0,5\%$  измеряемой величины. Если измеряемое сопротивление менее 1 Ом или более 100 000 Ом, погрешность не превышает  $\pm 5\%$ .

Плечо  $r$  моста выполнено в виде рычажного магазина сопротивлений, состоящего из четырех последова-

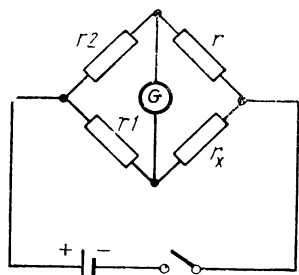


Рис. 1. Схема измерения сопротивлений универсальным мостом

тельно соединенных между собой групп сопротивлений, каждая из которых управляется отдельным рычажным переключателем. Группа — декада сопротивлений состоит из девяти одинаковых, точно подогнанных сопротивлений в 1, 10, 100 и 1000 Ом. Плечи  $r_1$  и  $r_2$  моста выполнены также в виде группы сопротивлений, управляемых одним рычажным переключателем, каждому положению которого соответствует определенное соотношение

плеч  $r_1/r_2$ , которое отсчитывается по обозначениям на лимбе рукоятки переключателя. Значение измеряемого сопротивления  $r_x$  определяют умножением полученного значения соотношения плеч  $r_1/r_2$  на сопротивление плеча  $r$ , т. е.  $r_x = (r_1/r_2)r$ .

Наивыгоднейшее (дающее наибольшую точность измерения) соотношение плеч моста  $r_1/r_2$ , а также напряжение источника питания схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Выбор напряжения источника питания и соотношения плеч универсального моста УМВ

Значение измеряемого сопротивления $r_x$ , Ом	Напряжение источника питания $U$ , В	Отношение плеч моста $r_1/r_2$
От 0 до 1	2	1 : 1000
» 1 » 10	4	1 : 1000
» 10 » 100	4	1 : 100
» 100 » 1 000	6	1 : 10
» 1 000 » 10 000	8	1 : 1
» 10 000 » 100 000	20	10 : 1
» 100 000 » 1 000 000	20	100 : 1

Измеряемое сопротивление подключают к зажимам моста  $r_x$ , а источник напряжения постоянного тока подключают к зажимам «+» и «—».

## Оборудование и аппаратура

Универсальный мост постоянного тока . . . . .	1 шт.
Резистор проволочный на 120 Ом . . . . .	1 »
Резистор проволочный на 12 Ом . . . . .	1 »
Резисторы непроволочные на 1 Вт от 1 до 1 000 000 Ом . . . . .	10 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	6 »
Источник постоянного тока (аккумуляторная батарея 10 КН-22м) . . . . .	2 »

## Порядок выполнения работы

1. Подключить к универсальному мосту резистор, измерить его сопротивление и записать в табл. 2. Измерение повторить для трех различных резисторов и результаты измерений также записать в табл. 2.

Таблица 2

Измерение омических проволочных и непроволочных сопротивлений

Способ соединения	$r_1$ , Ом	$r_2$ , Ом	$r_x$ , Ом	Расчет	Измерение
				$r$ , Ом	$r$ , Ом
Последовательное соединение					
Параллельное соединение					

2. Соединить измеренные резисторы последовательно и замерить их общее сопротивление. Результаты вычислений и измерений записать в табл. 3.

3. Соединить резисторы параллельно и измерить их общее сопротивление. Результаты вычислений и измерений записать в табл. 3.

4. Составить отчет.



Таблица 3

**Измерение электрических проволочных и непроволочных резисторов**

Соединение	$r_1$ , Ом	$r_2$ , Ом	$r_3$ , Ом	Расчет $r$ , Ом	Измерение $r$ , Ом	Примечания
Последовательное						
Параллельное						

Примечание. При каждом измерении указывать в графе «Примечания» отношение плеч моста и подведенное напряжение.

**Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры универсального моста для измерения активных сопротивлений и оборудования. Указать тип, марку, пределы точности резисторов.
3. Схема универсального моста и отношения плеч.
4. Табл. 2 и 3 с результатами измерений и вычислений.
5. Выводы о точности результатов измерений электрических сопротивлений при последовательном и параллельном их включении и выбранном соотношении плеч моста.

**Контрольные вопросы**

1. Какими методами можно измерить электрическое сопротивление постоянному току?
2. Каковы преимущества универсального измерительного моста?
3. Каково назначение плеч универсального моста?
4. С какой точностью можно измерить электрическое сопротивление универсальным измерительным мостом?
5. Как влияет сопротивление переходных контактов на точность измерения малых сопротивлений?
6. Как проверить исправность универсального моста и его точность?

**Работа № 14. ИЗМЕРЕНИЕ МЕГОММЕТРОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДОВ**

Цель работы — ознакомиться с устройством мегомметра и научиться измерять им сопротивление изоляции проводов и обмоток электродвигателей.

**Пояснения.** Хорошая изоляция проводки обеспечивает исправное действие всей электроустановки, поэтому периодически мегомметром необходимо проверять ее сопротивление, которое составляет обычно десятки и сотни мегом. Мегомметр состоит из генератора постоянного тока и измерительного прибора. Изоляцию проводов измеряют при отсутствии напряжения от постоянного источника электрической энергии. Схема мегомметра М-1101 показана на рис. 1, а. При изменении сопротив-

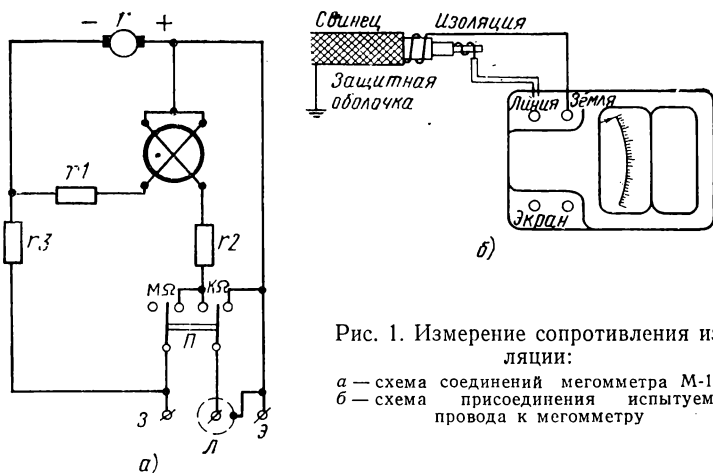


Рис. 1. Измерение сопротивления изоляции:

а — схема соединений мегомметра М-1101,  
б — схема присоединения испытуемого провода к мегомметру

ления зажим  $\mathcal{L}$  присоединяют к одному проводу линии, а зажим  $\mathcal{Z}$  — к другому проводу или к земле. Схема включения мегомметра дана на рис. 1, б. Для измерения сопротивления изоляции вращают рукоятку с частотой 120 об/мин и по шкале определяют ее величину.

## Оборудование и аппаратура

Мегомметр М-1101 на 500 В . . . . .	1 шт.
Электродвигатель трехфазного тока любой мощности . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . .	2 »

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и схемой мегомметра.

2. Измерить сопротивления изоляции между проводами трехфазной линии и между каждым фазным проводом и землей; потребители электрической энергии должны быть отключены. Результаты записать в табл. 1.

Таблица 1

Измерение сопротивлений изоляции проводов

Фаза — земля	$r_{из}$ , МОм	Фаза — фаза	$r_{из}$ , МОм
A — земля		A—B	
B — земля		B—C	
C — земля		C—A	

3. Измерить сопротивление изоляции всех обмоток статора трехфазного двигателя. Обмотки должны быть разомкнуты. Результаты измерений записать в табл. 2.

4. Составить отчет.

Таблица 2

Измерение сопротивления изоляции обмоток трехфазного электродвигателя

Фаза — корпус	$r_{из}$ , МОм	Фаза — фаза	$r_{из}$ , МОм
C 1 — корпус		A — B	
C 2 — корпус		A — C	
C 3 — корпус		C — A	

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры мегомметра, электрической линии и двигателя.
3. Табл. 1 и 2 с результатами измерений.
4. Вывод о пригодности линии и двигателя к дальнейшей эксплуатации.

### Контрольные вопросы

1. Как устроен мегомметр?
2. Для чего измеряют сопротивление изоляции?
3. При каком сопротивлении изоляции линии и электродвигатели непригодны к эксплуатации?

## Работа № 15. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ОДНОГО ВОЛЬТМЕТРА

Цель работы — ознакомиться с наиболее распространенным методом измерения сопротивлений с помощью одного вольтметра, применяемого в тестерах; научиться измерять вольтметром сопротивления проводов и изоляции.

**Пояснения.** Если сопротивление вольтметра  $r_v$  известно, вместо двух приборов — вольтметра и амперметра, необходимых для точного измерения электрического сопротивления, можно иметь только один прибор — вольтметр и источник постоянного напряжения — аккумуляторную батарею или гальванический элемент.

На рис. 1 показана схема, позволяющая измерить электрическое сопротивление  $r$ . Переключатель  $\Pi$  в положении  $I$  покажет напряжение

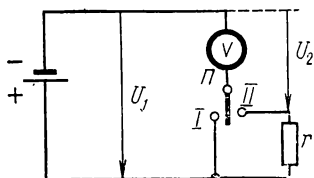


Рис. 1. Схема включения вольтметра для измерения неизвестного сопротивления  $r$

$$U_1 = I_1 r_v = \frac{U_j}{r_v} r_v,$$

а в положении  $II$  включает вольтметр последовательно с неизвестным сопротивлением  $r$ , при этом на вольтметр приходится напряжение

$$U_2 = I_2 r_v = \frac{U_j r_v}{r_v + r}.$$

Зная два показания вольтметра  $U_1$  и  $U_2$ , вычисляют величину измеряемого сопротивления

$$r = r_v \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right).$$

Таким образом, достаточно иметь один измерительный механизм, шкала которого отградуирована в омах, чтобы без всяких вычислений сразу по показанию стрелки измерить сопротивление. Такой прибор получил название омметра. Перед измерением с помощью регулировочного резистора «Установка нуля» при закор-

ченном положении щупов необходимо установить стрелку прибора на нуль, а затем прикоснуться щупами к измеряемому сопротивлению и отсчитать его по шкале.

## Оборудование и аппаратура

Вольтметр магнитоэлектрический М 210 на 30 В . . . . .	1 шт.
Аккумуляторная батарея 10ЖН-22 . . . . .	1 бат.
Резисторы проволочные на 100, 500, 1000, 5 000 и 10 000 Ом . . . . .	10 шт.
Омметр (или тестер ТЛ-4) . . . . .	1 »
Переключатель на два направления, однополюсный . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные, площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	8 »

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (см. рис. 1), измерить сопротивление резистора с помощью вольтметра и результаты записать в таблицу.

Т а б л и ц а

Измерения электрического сопротивления с помощью вольтметра и омметра

Тип резисторов, его параметры и точность	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$r_B$ , Ом	Вычислено $r$ , Ом	Измерено омметром $r$ , Ом	Примечание

2. Проверить величину сопротивления того же резистора с помощью омметра или тестера.

3. Сравнить результаты измерений.

4. Составить отчет.

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.

2. Основные параметры приборов и оборудования.

3. Схема включения приборов.

4. Таблица с результатами измерений и вычислений.
5. Вывод о точности и удобстве измерения сопротивления резистора одним прибором.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие законы электротехники лежат в основе метода измерения сопротивления с помощью одного вольтметра?
2. Какие условия необходимо соблюдать для повышения точности измерения?
3. Какой вольтметр (какого типа и класса точности) следует выбирать для получения высокой степени точности измерения?

### **Работа № 16. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ (АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА)**

Цель работы — изучить методы поверки технических электроизмерительных приборов (амперметра и вольтметра) по контрольным приборам; определить погрешности поверяемых приборов; сделать заключение о пригодности поверяемых приборов в соответствии их указанному на паспорте классу точности.

**Пояснения.** Электроизмерительные приборы подлежат периодической поверке сравнением их с более точными, принимаемыми за образцовые. Чтобы поверить амперметр  $A_{\text{п}}$ , нужно последовательно с ним включить образцовый амперметр  $A_0$  (рис. 1, а и б), при этом приборы, предназначенные для измерения постоянного тока присоединяют через резисторы к источнику постоянного напряжения (см. рис. 1, а), а приборы, предназначенные для измерения переменного тока, рекомендуется включать через понизительный трансформатор (см. рис. 1, б).

Поверяемый вольтметр  $V_{\text{п}}$  включают параллельно образцовому  $V_0$  (рис. 2, а), при этом наличие двух различных резисторов, включенных последовательно, позволяет более плавно регулировать напряжение. При поверке вольтметров переменного тока можно пользоваться автотрансформатором (рис. 2, б). При поверке электроизмерительных приборов необходимо плавно изменять регулируемую величину только в одну сторону — от нуля до максимума, а затем обратно — от максимума до нуля. При помощи регулирующих устройств стрелка поверяемого прибора поочередно устанавливается на

целые (оцифрованные) деления своей шкалы. Это показание записывают в протокол градуировки. Рядом записывают показание образцового прибора. Разница между показаниями поверяемого и образцового приборов называется абсолютной погрешностью амперметра или вольтметра:

$$\Delta A = I - I_0; \Delta U = U - U_0,$$

где  $I$  и  $U$  — показания поверяемых приборов;  $I_0$  и  $U_0$  — показания образцовых приборов.

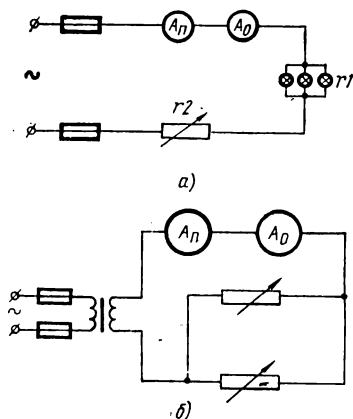


Рис. 1. Схема проверки амперметра:

а — с одним регулирующим резистором, б — с понижающим трансформатором и двумя регулирующими резисторами;  $A_n$  и  $A_0$  — поверяемый и образцовый амперметры

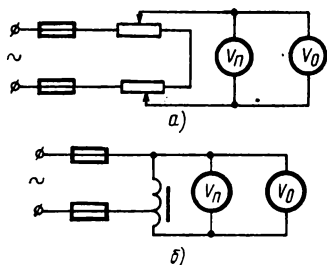


Рис. 2. Схемы проверки вольтметра:

а — с двумя резисторами, включенным потенциометром, б — с автотрансформатором;  $V_n$  и  $V_0$  — поверяемый и образцовый вольтметры

Приведенная погрешность определяется как процентное отношение абсолютной погрешности  $\Delta A$  ( $\Delta U$ ) к номинальному пределу измерения прибора (полному отклонению стрелки по шкале прибора)  $A_n$ :

$$\gamma_{пр} = \frac{\Delta A}{A_n} 100\%.$$

Приведенная максимальная погрешность не должна превышать класса точности испытуемого прибора, т. е. для приборов класса 1,5 не должна быть более 1,5%,

класса 2,5 — не более 2,5% и т. д. (если она больше класса точности, прибор требует ремонта). Приведенная погрешность прибора, определенная в нормальных рабочих условиях, называется основной.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переносной аstaticеский АСТ/7 на 0—5—10 А, класс точности 0,5 . . . . .	1 шт.
Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	1 »
Вольтметр переносной аstaticеский электромагнитный АМВ на 150 В, класс точности 0,5 . . . . .	1 »
Вольтметр щитовой электромагнитный на 150 В . . . . .	1 »
Трансформатор школьный (понижающий) на 120/3 В . . . . .	1 »
Рубильник двухполюсный на 250 В, 60 А . . . . .	1 »
Реостаты проволочные переменного сопротивления на 5 А, 10 и 2,5 Ом . . . . .	по 1 »
Панель с четырьмя потолочными патронами . . . . .	1 »
Лампы накаливания на 127 В, 50, 100, 150 и 200 Вт . . . . .	по 1 »
Автотрансформатор ЛАТР-1 . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	8 »
Источник переменного тока на 127 В, 50 Гц . . . . .	

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для поверки амперметра (см. рис. 1, а или б), включить приборы и, медленно повышая показания до максимума, в течение 10—15 мин прогреть их током, отключить приборы и установить стрелки на нулевых отметках шкалы.

2. Произвести поверку градуировки шкалы и результаты записать в табл. 1.

Таблица 1

Протокол поверки амперметра

№ опыта	Показания амперметров, А		Результаты вычислений		Примечания
	заводской № поверяемый $I$	заводской № образцовый $I_0$	$\Delta A$ , А	$T_{пр}$ , %	

Примечание. Количество поверяемых точек должно быть не менее 6—8.



3. Вычислить абсолютную и приведенную погрешности амперметра, записать их в табл. 1 и сделать вывод о пригодности поверяемого прибора.

4. Собрать схему (см. рис. 2, а или б) для проверки вольтметров и выполнить п. 1.

5. Произвести поверку вольтметра и результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

Протокол поверки вольтметра

№ опыта	Показания вольтметров, В		Результаты вычислений		Примечания
	заводской № поверяемый $V_{\text{п}}$	заводской № образцовый $V_{\text{о}}$	$\Delta U$ , В	$\gamma_{\text{пр}}$ , %	

6. Вычислить абсолютную и приведенную погрешности вольтметра, записать их в табл. 2 и сделать вывод о пригодности прибора.

7. Составить отчет.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.

2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.

3. Схема поверки амперметра.

4. Табл. 1 с результатами измерений и вычислений (в примечании указать время прогрева прибора и условные обозначения, помещенные на шкале амперметра).

5. Вывод о пригодности испытанного амперметра.

6. Схема поверки вольтметра.

7. Табл. 2 с результатами измерений и вычислений (в примечании указать время прогрева прибора и условные обозначения, помещенные на шкале вольтметра).

8. Вывод о пригодности испытанного вольтметра.

### Контрольные вопросы

1. Как поверяют амперметр, вольтметр (порядок подготовки и проведения работы)?

2. Что называют абсолютной и основной погрешностями прибора?

3. Зачем прибор прогревают током перед градуировкой?
4. По каким признакам прибор признают непригодным для дальнейшей эксплуатации?

### Работа № 17. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Цель работы — научиться электрическими методами измерять неэлектрические величины (в данной работе — температуру); выявить преимущества и недостатки этих методов.

**Пояснения.** Термометры электрического сопротивления (рис. 1, а и б). Металлические проводники электрического тока при нагревании увеличивают свое электрическое сопротивление. Между сопро-

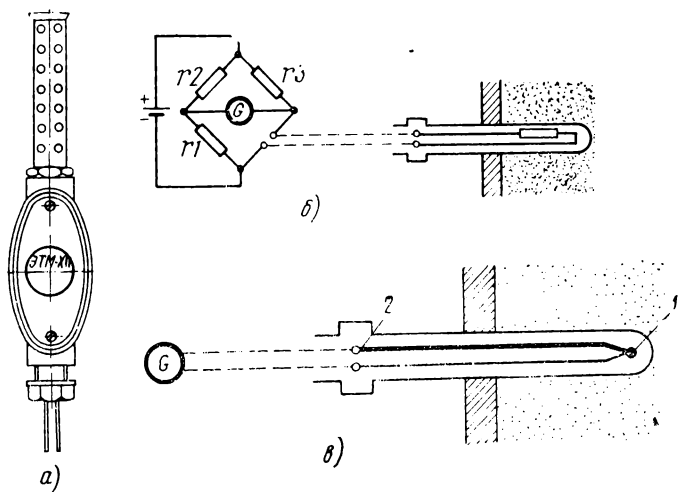


Рис. 1. Измерение температур электрическими методами:  
а — общий вид термометра сопротивления, б — схема включения термометра сопротивления, в — схема включения термопары; 1 — горячий спай, 2 — холодный спай

тивлением и температурой проводника при изменении его температуры в пределах от 0 до 200° С существует следующая зависимость.

$$r_T = r_x (1 + \alpha T),$$

где  $T$  — разность температуры нагретого  $T_T$  и холодного  $T_x$  термометров, °С;  $r_T$  и  $r_x$  — соответственно актив-

ные электрические сопротивления металлического термометра сопротивления в нагретом и холодном состояниях при температурах  $T_r$  и  $T_x$ , Ом;  $\alpha$  — температурный коэффициент увеличения сопротивления проводника при повышении его температуры на 1 К (для платины  $\alpha=38/10\,000$ , для вольфрама  $\alpha=48/10\,000$ , для меди  $\alpha=43/10\,000$  в пределах от 0 до 100° С), 1/град.

Таким образом, если известны сопротивления термометра в холодном  $r_x$  и нагретом  $r_r$  состояниях, по этой формуле можно вычислить температуру нагретого проводника. В этом случае предполагают, что проводник имеет ту же температуру, что и среда, в которую помещен термометр сопротивления и вычисляют ее по формуле

$$T_r = T_x + T,$$

где

$$T = \frac{r_r - r_x}{r_x \alpha} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{r_r}{r_x} - 1 \right).$$

В качестве чувствительных элементов в термометрах сопротивления применяют чистые металлы — платину и медь. Платиновые термометры сопротивления ЭТП-I, ЭТП-III, ЭТП-XXI предназначены для измерения температур от 270 до 800 К ( $0 \pm 500^\circ \text{C}$ ), а медные ЭТМ-X, ЭТМ-XI, ЭТМ-010 — от 220 до 425 К (от  $-50$  до  $+150^\circ \text{C}$ ).

**Термисторы.** Пользуясь для измерения температуры термисторами (полупроводниками), следует иметь в виду, что их электрическое сопротивление при нагревании в большинстве случаев уменьшается. Сопротивление термистора следует измерять при ничтожной силе тока (несколько миллиампер), так как его мощность невелика и от нагревания проходящим током его температура становится выше температуры измеряемой среды.

**Термопары.** При использовании для измерения температуры термопар (рис. 1, в) нужно учитывать, что их э. д. с. зависит от разности температур холодного и нагретого спаев и материалов, из которых изготовлена термопара. Промышленность СССР выпускает термопары разных типов: для измерения температур до 2000 К, ТПП-II, ТПП-IV.

## Оборудование и аппаратура

Термометр ртутный на 20—120°С . . . . .	2 шт.
Термометр сопротивления медный ЭТМ-XII . . .	1 »
Термопара хромель-копелевая ТХК-067 . . .	1 »
Мост универсальный УМВ . . . . .	1 »
Гальванометр на 10 <sup>-6</sup> А . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . .	4 »
Аккумуляторная батарея 4НКН-45 . . . . .	1 »

## Порядок выполнения работы

- Измерить активное сопротивление электрического термометра при двух различных температурах, контролируемых стеклянными термометрами, и записать результаты измерений в табл. 1.
- На основании данных табл. 1 построить график зависимости сопротивления от температуры.

Таблица 1

### Измерение температуры электрическим термометром сопротивления

№ опыта	Измерено			Вычислено		
	$T_x, ^\circ\text{C}$	$T_r, ^\circ\text{C}$	$r_x, \text{Ом}$	$T = T_r - T_x, ^\circ\text{C}$	$r_r, \text{Ом}$	$T = \frac{1}{\alpha} (r_r/r_x - 1), ^\circ\text{C}$

- То же повторить с термистором.
- Измерить температуру холодного и горячего спаев термопары и ее э. д. с. и записать результаты испытаний в табл. 2.
- На основании данных табл. 2 составить график зависимости э. д. с. термопары от разности температур между ее нагретым и холодным спаями (график градуировки термопары).
- Составить отчет.

Таблица 2

### Результаты испытания термопар

Тип термопары	Измерено			Вычислено
	$T_x, ^\circ\text{C}$	$E, \text{В}$	$T_r, ^\circ\text{C}$	$T = T_r - T_x, ^\circ\text{C}$

## **Содержание отчёта**

1. Наименование отчета.
2. Параметры измерительных приборов и оборудования.
3. Схема измерения температуры термометром сопротивления.
4. Табл. 1 с результатами измерений и вычислений.
5. График зависимости сопротивления термометра от температуры (выполняется на миллиметровой или клетчатой бумаге).
6. Схема измерения температуры с помощью термопары.
7. Табл. 2 с результатами измерений и вычислений.
8. Схема градуировки термопары.
9. Выводы о преимуществах и недостатках электрических методов измерения температуры.

## **Контрольные вопросы**

1. Из каких материалов изготавливают термометры электрического сопротивления и какова величина их сопротивления при температуре 273 К (20° С)?
2. В каких случаях применяют медные и платиновые термометры сопротивления?
3. Какое сопротивление должны иметь соединительные провода к термометру сопротивления?
4. Каковы преимущества термометров электрического сопротивления?
5. Как устроена термопара, из каких материалов ее изготавливают и какие температуры ею измеряют?
6. Какое влияние оказывает температура холодного спая термопары на показание прибора?

## **ТРАНСФОРМАТОРЫ**

### **Работа № 18. ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Цель работы — ознакомиться с устройством, назначением и основными характеристиками однофазного двухобмоточного трансформатора; измерить коэффициент трансформации и снять характеристики холостого хода, короткого замыкания и внешние характеристики трансформатора.

**Пояснения.** Однофазный трансформатор имеет магнитопровод, набранный из листовой трансформаторной стали, на котором размещены две обмотки (рис. 1, а) с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ . В зависимости от номинальных напряжений у трансформаторов принято различать обмотки высшего и низшего напряжения. Однофазный трансформатор служит для преобразования однофазного переменного тока одного напряжения в другое той

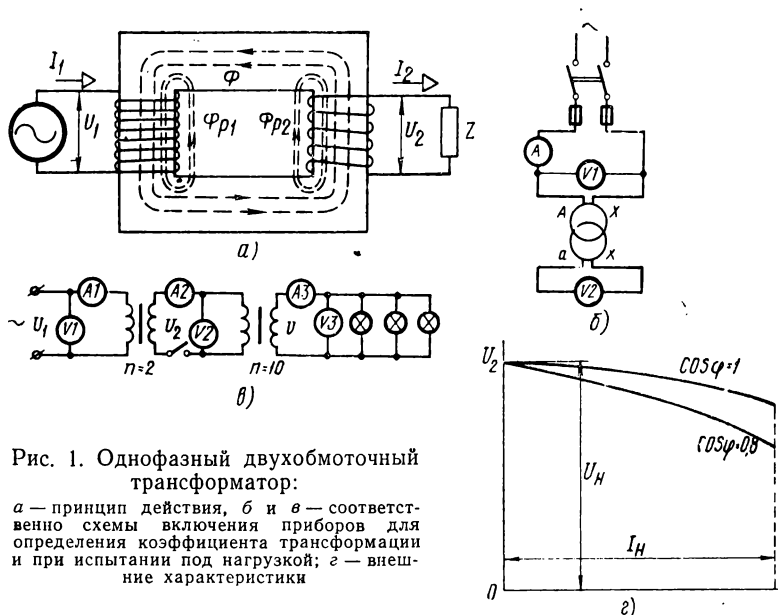


Рис. 1. Однофазный двухобмоточный трансформатор:

а — принцип действия, б и в — соответственно схемы включения приборов для определения коэффициента трансформации и при испытании под нагрузкой; г — внешние характеристики

же частоты. На рис. 1, а показаны главный магнитный поток  $\Phi_0$  и магнитные потоки рассеяния  $\Phi_{p1}$  и  $\Phi_{p2}$ . Коэффициент трансформации по напряжению  $n_e$  показывает, во сколько раз число витков первичной обмотки  $w_1$  больше числа витков вторичной обмотки  $w_2$  (во сколько раз э. д. с. первичной обмотки больше э. д. с. вторичной обмотки):

$$n_e = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_1}{U_2}.$$

Коэффициентом трансформации считается отношение высшего напряжения к низшему, измеренные при

холостом ходе трансформатора (рис. 1, б). Начало первичной обмотки высшего напряжения обозначают  $A$ , конец —  $X$ , начало вторичной обмотки низшего напряжения —  $a$ , конец —  $x$ .

При холостом ходе трансформатор потребляет из сети мощность, которая идет на потери в стали (потери на перемагничивание магнитопровода и на вихревые токи в нем). Зависимости тока холостого хода, потребляемой трансформатором мощности и коэффициента мощности от напряжения, подводимого к первичной обмотке, называются характеристиками холостого хода. Опыт холостого хода позволяет определить состояние стали трансформатора. Если потери мощности при холостом ходе окажутся значительно больше нормальных, в таком трансформаторе неисправен магнитопровод.

Для проведения опыта короткого замыкания к первичной обмотке трансформатора подводят такое пониженное напряжение, при котором по вторичной замкнутой накоротко обмотке протекает номинальный ток. Если при этом ваттметр покажет потери мощности больше номинальных, это значит, что неисправна обмотка трансформатора. Зависимости потребляемого тока, мощности и коэффициента мощности от подведенного напряжения (при замкнутой накоротко вторичной обмотке) называются характеристиками короткого замыкания. В результате опыта короткого замыкания определяют электрические потери мощности в обмотках трансформатора. В данной работе (рис. 1, в) предусмотрен понижающий трансформатор 120/12. В.

Так как трансформаторы обладают высоким к. п. д., подводимая к ним мощность почти такая же, как отводимая, поэтому можно считать, что ток изменяется обратно пропорционально напряжению и полная номинальная мощность однофазного трансформатора

$$S_n = U_n I_n,$$

где  $U_n$  и  $I_n$  — номинальные напряжения (В) и ток (А) вторичной обмотки трансформатора.

С увеличением нагрузки напряжение на зажимах вторичной обмотки понижается. Зависимость напряжения  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$  при неизменном первичном напряжении  $U_1$  и частоте  $f$  называют внешней характеристикой трансформатора (рис. 1, г). Наклон внешней характеристики зависит от коэффициента мощности:

чем ниже коэффициент мощности при индуктивной нагрузке, тем больше падает напряжение с ростом нагрузки.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . .	по 2 шт.
Амперметр переменного тока на 20 А . . . .	1 »
Вольтметры переменного тока на 250, 150 и 30 В . . . . .	по 1 »
Трансформатор однофазный мощностью 0,5 кВ·А на 380/127 В . . . . .	1 »
Трансформатор понижающий однофазный мощностью 300 В·А на 120/12 В . . . . .	1 »
Панель с четырьмя потолочными патронами	1 »
Лампа накаливания на 12 В, 50 Вт . . . . .	4 »
Рубильник однополюсный на 40 А . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . .	14 »
Источник переменного тока напряжением 380 В, 50 Гц	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия однофазного трансформатора.
2. Составить схему (см. рис. 1, б) и включить приборы для измерения коэффициента трансформации, определить коэффициент трансформации.
3. Измерить ток холостого хода, снять характеристику холостого хода и результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика холостого хода однофазного трансформатора

$U_1$ , В	$I_x$ , А	$P_x$ , Вт	$E_2$ , В	Примечания

4. Составить схему и включить приборы для снятия характеристики короткого замыкания, снять характеристику и результаты записать в табл. 2.

5. Включить приборы и замерить полную мощность, подводимую к трансформатору из сети и отдаваемую потребителям (см. рис. 1, в).



Таблица 2

**Характеристика короткого замыкания однофазного трансформатора**

$U_1$ , В	$I_K$ , А	$P_K$ , Вт	Примечания

Снять внешнюю характеристику трансформатора по трем точкам для тока  $I_2 = 0,5 I_n$ ;  $I_2 = I_n$  (см. рис. 1, в) и результаты записать в табл. 3.

7. Составить отчет.

Таблица 3

**Внешняя характеристика однофазного трансформатора**

$f$ , Гц	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$U_3$ , В	$I_3$ , А	$\cos \varphi$	Примечания

**Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов, аппаратов и оборудования.
3. Схема включения приборов для определения коэффициента трансформации и измерения тока холостого хода (см. рис. 1, б).
4. Коэффициент трансформации  $n = \dots$ , ток холостого хода  $I_0 = \dots$  А при напряжении  $U = \dots$  В,  $f = \dots$  Гц.
5. Табл. 1 с результатами измерений и график характеристик холостого хода.
6. Схема включения приборов для снятия характеристик короткого замыкания.
7. Табл. 2 с результатами измерений и график характеристик короткого замыкания.
8. Схема включения приборов для снятия внешней характеристики (см. рис. 1, в).
9. Табл. 3 с результатами измерений и график внешней характеристики трансформатора.
10. Выводы по работе о пригодности трансформатора к эксплуатации.

## Контрольные вопросы

1. Каково устройство и принцип действия однофазного силового трансформатора?
2. Что такое коэффициент трансформации и как его определить?
3. Как определить число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора?
4. Почему при росте нагрузки понижается напряжение на вторичной обмотке трансформатора?
5. Как величина напряжения влияет на силу тока холостого хода трансформатора?
6. Что такое коэффициент полезного действия трансформатора и от чего он зависит?
7. Каковы потери мощности трансформатора при холостом ходе и при нагрузке?
8. Можно ли перегружать трансформатор сверх его номинальной мощности и как долго?

## Работа № 19. ВКЛЮЧЕНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СЕТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Цель работы — ознакомиться со схемами включения однофазных трансформаторов в сеть трехфазного тока и усвоить особенности их соединения в звезду и треугольник; научиться определять мощность трехфазной трансформаторной группы.

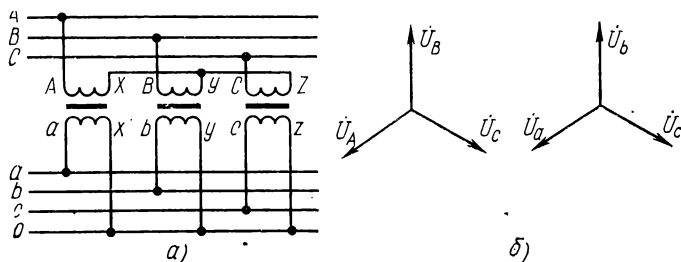


Рис. 1. Соединение трех однофазных силовых трансформаторов по схеме звезда — звезда с выведенной нулевой точкой в сеть трехфазного тока:

*a* — схема соединений, *б* — векторные диаграммы

**Пояснения.** Если соединить первичные обмотки трех одинаковых однофазных двухобмоточных силовых трансформаторов в звезду, а их выводы присоединить к трехфазной системе переменного тока, получится трехфазная трансформаторная группа. На рис. 1, *a* по-

казана схема включения трех однофазных трансформаторов, первичные и вторичные обмотки которых соединены в звезду, а на рис. 1, б — векторные диаграммы. Линейные напряжения  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$  в  $\sqrt{3}$  раз (1,73 раза) больше фазных напряжений  $\dot{U}_{AX}$ ,  $\dot{U}_{BY}$  и  $\dot{U}_{CZ}$ . Такое же соотношение напряжений вторичных обмоток. Приведенная схема включения относится к группе 0, так как между векторами линейных э. д. с. первичной и вторичной обмоток сдвиг фаз равен нулю. Условное обозначение такой схемы: Y/Y—0.

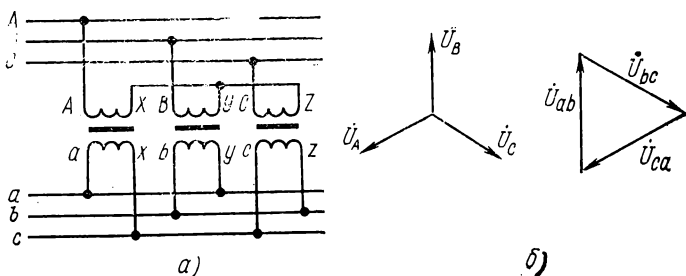


Рис. 2. Соединение трех однофазных силовых трансформаторов по схеме звезда — треугольник в сеть трехфазного тока:  
а — схема соединений, б — векторные диаграммы

Обмотки трех однофазных трансформаторов могут быть включены также в треугольник (рис. 2), при этом первичные обмотки соединяют в звезду, вторичные — в треугольник, группа соединений 11, так как векторы вторичной э. д. с. по отношению к векторам первичной э. д. с. повернуты на угол  $330^\circ$  ( $11\pi/6$  радиана). Во вторичной обмотке линейное напряжение равно фазному. Условное обозначение такой схемы Y/ $\Delta$ —11. Возможны и другие соединения обмоток.

От трех однофазных трансформаторов одинаковой мощности можно получить электрическую мощность трехфазного тока, равную сумме мощностей всех трех трансформаторов:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = 3S_1 = 3U_\phi I_\phi,$$

где  $S_1 = S_2 = S_3$  — полная мощность каждого трансформатора, Вт;  $U_\phi$  — фазное напряжение, В;  $I_\phi$  — фазный ток, А.

Суммарная мощность трех трансформаторов равна сумме мощностей этих трансформаторов при любой схеме соединений их обмоток. Если взять два однофазных трансформатора и включить их в сеть трехфазного тока по схеме, показанной на рис. 3, со вторичной сто-

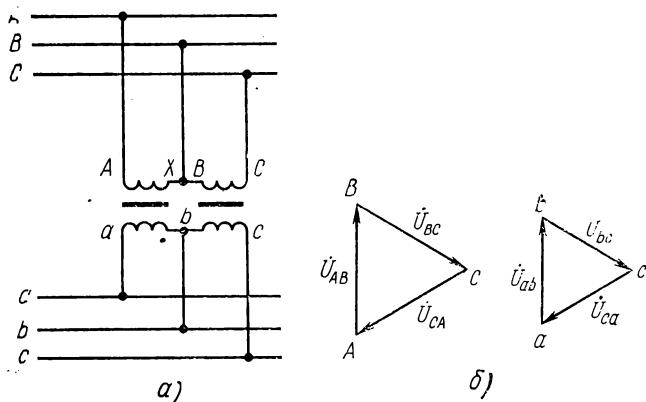


Рис. 3. Соединение двух однофазных трансформаторов в открытый треугольник:  
а — схема, б — векторные диаграммы

роны этих трансформаторов можно получить трехфазную симметричную систему. Такое включение называют соединением в открытый треугольник.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . .	6 шт.
Амперметр переменного тока на 1 А . . .	3 »
Вольтметры переменного тока на 250 и 150 В . . . . .	по 3 »
Ваттметр однофазный на 220 В, 5 А . . .	3 »
Трансформатор однофазный на 220/110 В, 500 Вт, 50 Гц . . . . .	3 »
Рубильник однополюсный 500 В, 25 А . . .	3 »
Рубильник трехполюсный 500 В, 25 А . . .	1 »
Резистор проволочный регулировочный 30 Ом, 5 А . . . . .	6 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м .	25 »
Источник трехфазного тока 380/220 В, 50 Гц, мощностью 2 кВт	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством однофазного двухобмоточного трансформатора.

2. Составить схему (см. рис. 1, а) включения трех однофазных трансформаторов. Включить в первичную обмотку каждого трансформатора по одному амперметру, вольтметру и ваттметру, а ко вторичной обмотке присоединить по одному вольтметру и по одному амперметру.

3. Включить трансформаторы в трехфазную сеть и измерить потребляемую ими мощность при холостом ходе и при нагрузке. Показания приборов записать в табл. 1.

Таблица 1

Соединение трех трансформаторов Y/Y — 0

Режим	Напряжение, В			Ток, А			Мощность, Вт				Ток, А		
	$U_{AX}$	$U_{BY}$	$U_{CZ}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$\Sigma P$	$I_a$	$I_b$	$I_c$
Холостой ход													
Нагрузка													

4. Соединить однофазные трансформаторы по схеме (см. рис. 2, а), изменив схему включения только вторичной обмотки.

Таблица 2

Соединение трех трансформаторов Y/Δ — 11

Режим	Напряжение, В			Ток, А			Мощность, Вт				Ток, А		
	$U_{AX}$	$U_{BY}$	$U_{CZ}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$\Sigma P$	$I_a$	$I_b$	$I_c$
Холостой ход													
Нагрузка													

5. Включить трансформаторы в трехфазную сеть и измерить потребляемую ими мощность при холостом ходе и при нагрузке. Показания приборов записать в табл. 2.

6. Включить два однофазных трансформатора в трехфазную сеть открытым треугольником (см. рис. 3) и измерить напряжение на всех зажимах вторичных обмоток.

### **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры трансформаторов и измерительных приборов.
3. Схемы включения измерительных приборов и трансформаторов.
4. Табл. 1 и 2.
5. Построить векторные диаграммы напряжений для трансформаторов, соединенных по группе «0» и «11».
6. Составить отчет.

### **Контрольные вопросы**

1. Сколько обмоток имеет однофазный трансформатор?
2. По каким схемам можно соединять первичные и вторичные обмотки трех однофазных трансформаторов?
3. Какие преимущества дает схема соединения вторичных обмоток в звезду с выведенной нулевой точкой?
4. Какое соотношение линейного и фазного напряжений получается при соединении обмоток в звезду и треугольник?
5. Какие преимущества и недостатки имеет групповой трансформатор по сравнению с одним трехфазным трансформатором?
6. Чему равен угол между векторами напряжения первичной и вторичной обмоток трансформаторов, включенных по группе «0» и по группе «11»?

### **Работа № 20. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Цель работы — ознакомиться с устройством и основными характеристиками трехфазного трехстержневого трансформатора, усвоить приемы его включения в сеть; измерить ток холостого хода в трех фазах при симметричном напряжении; провести опыт короткого замыкания; измерить мощность, подводимую к трансформатору и вторичное напряжение.

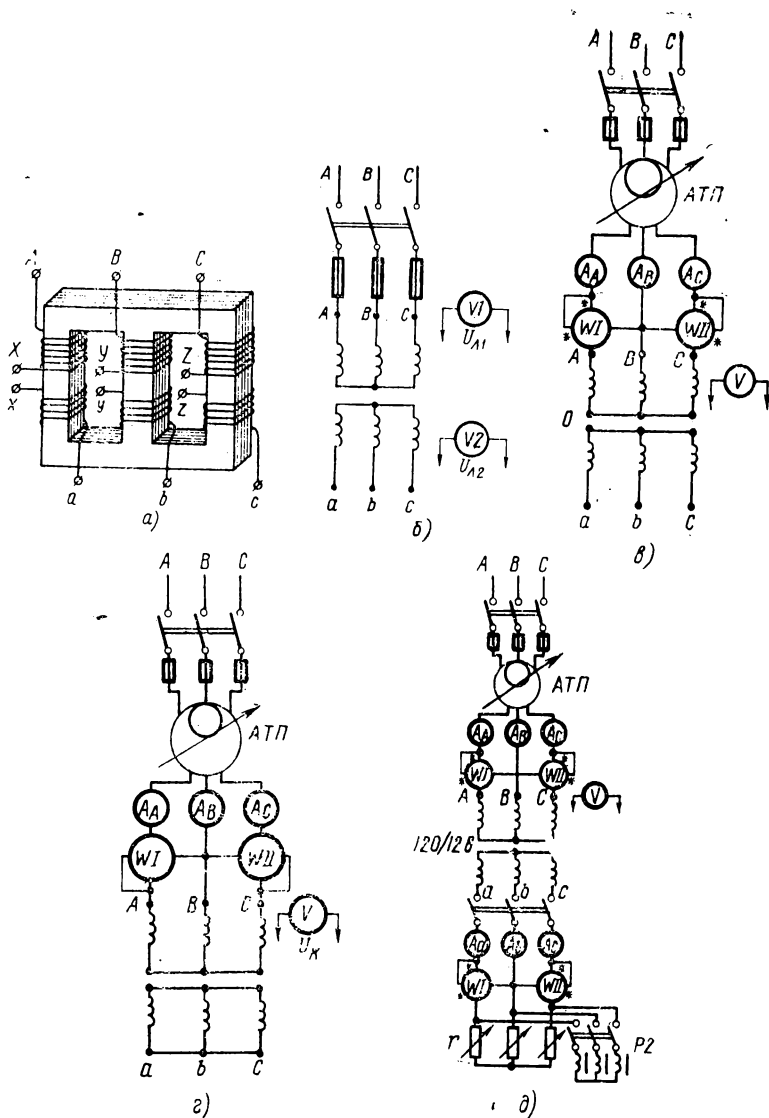


Рис. 1. Схемы соединений трехфазного трехсердечного двухобмоточного трансформатора:

$a$  — устройство,  $б$  — для определения коэффициента трансформации,  $в$  — для проведения опыта холостого хода,  $г$  — для проведения опыта короткого замыкания,  $д$  — для снятия внешней характеристики

**Пояснения.** Основными частями трехфазного трех-  
 стержневого трансформатора (рис. 1, а) являются трех-  
 стержневой магнитопровод, набранный из листовой  
 трансформаторной стали, и шесть обмоток: три выше-  
 го (по числу фаз трехфазной системы) и три низшего  
 напряжения. На каждом стержне расположены две об-  
 мотки — первичная и вторичная. Для силовых трехфаз-  
 ных двухобмоточных трансформаторов установлены сле-  
 дующие основные схемы и группы соединения обмоток:  
 звезда — звезда с выведенной нулевой точкой, звезда —  
 треугольник, звезда с выведенной нулевой точкой — тре-  
 угольник и треугольник — звезда с выведенной нулевой  
 точкой.

Схема соединения обмоток звезда — звезда с выве-  
 денной нулевой точкой имеет группу 0, т. е. угол сдви-  
 га между векторами э. д. с. первичной и вторичной об-  
 мотками одной и той же фазы равен нулю, а остальные  
 схемы принадлежат к группе 11, т. е. угол сдвига меж-  
 ду векторами э. д. с. первичной и вторичной обмотка-  
 ми той же фазы равен  $330^\circ$ .

Номинальная мощность трехфазного трансформа-  
 тора

$$S = 3U_{\phi} I_{\phi},$$

а активная мощность

$$P_n = 3U_{\phi.n} I_{\phi.n} \cos \varphi,$$

или

$$P_n = \sqrt{3} U_{л.н} I_{л.н} \cos \varphi.$$

К трехфазному трансформатору, вторичная обмотка  
 которого включена по схеме звезда с выведенной нуле-  
 вой точкой, можно присоединить потребителей электри-  
 ческой энергии на два различных напряжения — линей-  
 ное и фазное: так, к трехфазному трансформатору с  
 фазным вторичным напряжением в 127 В, включенно-  
 му по схеме звезда с выведенной нулевой точкой, мож-  
 но присоединить электрические лампы накаливания на  
 127 В, включая их на фазное напряжение, и на 220 В,  
 включая их на линейное напряжение. Для полного ис-  
 пользования трехфазного трансформатора все его фазы  
 следует нагружать одинаковым током (симметрично):  
 в этом случае потери минимальны.



Между э. д. с. первичной и вторичной обмоток имеется сдвиг по фазе, который условно обозначают группой трансформатора. На параллельную работу можно включать трехфазные трансформаторы, относящиеся к одинаковой группе.

## Оборудование и аппаратура

Амперметры переменного тока на 20, 3 и 1 А . . . . .	по 3 шт.
Вольтметры электромагнитные на 250, 50 и 30 В . . . . .	» 1 »
Ваттметр на 127 В, 5 А . . . . .	2 »
Ваттметр на 100 В, 20 А . . . . .	2 »
Ваттметр трехфазный на 127 В, 5 А . . . . .	2 »
Трансформатор трехфазный трехстержневой мощностью 1 кВт на 220/36 В . . . . .	1 »
Регулятор индукционный (поворотный трансформатор) от 0 до 400 В мощностью 1 кВт на напряжение 220 В . . . . .	1 »
Реостат проволочный на 20 А, 10 Ом . . . . .	3 »
Катушка индуктивности трехфазная с подвижным сердечником . . . . .	3 »
Рубильник трехполюсный на 250 В, 60 А . . . . .	2 »
Рубильник трехполюсный на 150 В, 100 А . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	25 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 6 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	15 »
Источник трехфазного тока на 127/220 В, мощностью 2 кВт . . . . .	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством трехфазного трансформатора.

2. Составить схему включения трансформаторов (рис. 1, б), измерить первичное и вторичное линейные напряжения и вычислить коэффициент трансформации

$$n_e = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}}; \quad n_e = \frac{U_{л1}}{U_{л2}}.$$

3. Измерить мощность потерь при холостом ходе и ток холостого хода во всех трех фазах при номинальной частоте ( $f=50$  Гц) и номинальном напряжении (рис. 1, в) и результаты записать в табл. 1.

4. Снять характеристику холостого хода (см. рис. 1, в), изменяя при помощи индукционного регулято-

Таблица 1

## Характеристика холостого хода трехфазного трансформатора

Напряжение, В						Ток, А				Мощность, Вт		
$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{A0}$	$U_{B0}$	$U_{C0}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{cp}$	$P_I$	$P_{II}$	$\Sigma P_x$

ра подводимое напряжение от 0,3 до 1,2  $U_H$ . Показания приборов записать в табл. 1.

5. Вычислить в процентах ток холостого хода по формуле

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3I_H} 100\% = \frac{I_{cp,0}}{I_H} 100\%.$$

6. Вычислить напряжение короткого замыкания трансформатора и подвести его к трансформатору.

7. Собрать схему (рис. 1, з), измерить мощность потерь при коротком замыкании трансформатора при номинальном токе, вычислить потери при номинальном напряжении и токе во всех обмотках и записать результаты измерений и вычислений в табл. 2.

Таблица 2

## Опыт короткого замыкания трехфазного трансформатора

$U_K$ , В	$I_A$ , А	$I_B$ , А	$I_C$ , А	$I_{cp}$ , А	$P_I$ , Вт	$P_{II}$ , Вт	$\Sigma P$ , Вт	$\cos \varphi$

8. Снять перемычку, замыкающую вторичные обмотки трансформатора накоротко, и подключить к выводам вторичной обмотки активное сопротивление или лампы накаливания (рис. 1, д). Измерить мощность, подводимую к трансформатору из сети и отдаваемую им лампам накаливания. Вычислить мощность на вторичной стороне при чисто активной нагрузке по формуле

$$\Sigma P_2 = P_a + P_b + P_c = U_{a0} I_a + U_{b0} I_b + U_{c0} I_c,$$

где  $\Sigma P_2$  — мощность, отдаваемая трансформатором лампам накаливания, Вт;  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_c$  — мощности фаз  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , Вт;  $U_{a0}$  и  $I_a$ ,  $U_{b0}$  и  $I_b$ ,  $U_{c0}$  и  $I_c$  — напряжения и токи фаз  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

9. Записать результаты измерений в табл. 3.

Внешняя характеристика трехфазного трансформатора

Нагрузка	Первичная обмотка						
	$U_1 = U_{A0}, \text{ В}$	$I_A, \text{ А}$	$I_B, \text{ А}$	$I_C, \text{ А}$	$P_I, \text{ Вт}$	$P_{II}, \text{ Вт}$	$\Sigma P_1, \text{ Вт}$
Активная							
Смешанная							

Нагрузка	Вторичная обмотка						
	$U_2 = U_{ab}, \text{ В}$	$I_a, \text{ А}$	$I_b, \text{ А}$	$I_c, \text{ А}$	$P_I, \text{ Вт}$	$P_{II}, \text{ Вт}$	$\Sigma P_2, \text{ Вт}$
Активная							
Смешанная							

10. Присоединить к трансформатору параллельно лампам накаливания индуктивную нагрузку и повторить замеры при активно-индуктивной нагрузке. Результаты измерений записать в табл. 3.

11. Составить отчет.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры измерительных приборов и оборудования.
3. Схема включения измерительных приборов для определения коэффициента трансформации (см. рис. 1, б). Коэффициент трансформации  $n = \dots$
4. Схема включения приборов и оборудования для снятия характеристики холостого хода (см. рис. 1, в), табл. 1 с результатами измерений и вычислений (определить ток холостого хода в процентах и мощность потерь при холостом ходе и номинальном напряжении), график характеристики холостого хода, построенный на основании данных табл. 1.

5. Схема включения приборов и оборудования для снятия характеристики короткого замыкания (см. рис. 1, *з*), табл. 2 с результатами измерений и вычислений.

6. Схема включения приборов и оборудования для испытания трансформатора под нагрузкой (снятие внешней характеристики); табл. 3 с результатами измерений и вычислений, график внешней характеристики, построенный по данным табл. 3.

7. Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Сколько обмоток имеет трехфазный двухобмоточный трансформатор?

2. Почему сердечник трансформатора выполняется из тонких листов электротехнической стали?

3. Как определить коэффициент трансформации трехфазного силового трансформатора?

4. Как проверить правильность обозначений зажимов трехфазного трансформатора?

5. Какую величину имеет ток холостого хода трансформатора в процентах?

6. Почему токи холостого хода в крайних фазах трансформатора больше тока в средней фазе?

7. Каковы потери мощности трехфазного трансформатора при нагрузке и как их определить?

8. Что такое к. п. д. трехфазного трансформатора? Как его определить?

9. Какой трансформатор называют повышающим и какой понижающим?

10. Как определить исправность трехфазного трансформатора?

### **Работа № 21. ВКЛЮЧЕНИЕ ДВУХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ**

Цель работы — изучить условия, при которых допустимо включение трехфазных трехстержневых трансформаторов на параллельную работу; исследовать параллельную работу двух трехфазных трансформаторов.

**Пояснения.** Параллельной называется работа трансформаторов при параллельном соединении как первичных, так и вторичных обмоток, как это показано на рис. 1, *а*. На трансформаторных подстанциях нагрузка в течение времени непрерывно изменяется, что зависит от количества и мощности потребителей электрической энергии: ночью она минимальна, а в дневное или в ве-

чернее время — максимальна, и, если один трансформатор при такой нагрузке оказывается перегруженным, он может выйти из строя. Чтобы этого не произошло, параллельно подключают второй трансформатор, и нагрузка распределяется между ними.

Трансформаторы могут работать параллельно, если у них одинаковое число фаз, одинаковые номинальные напряжения у первичных и вторичных обмоток, а следовательно, одинаковые коэффициенты трансформации по напряжению; одна и та же группа соединений об-

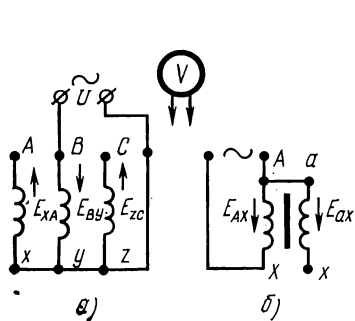


Рис. 1. Проверка маркировки зажимов обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора:

*a* — высшего напряжения, *б* — низшего напряжения

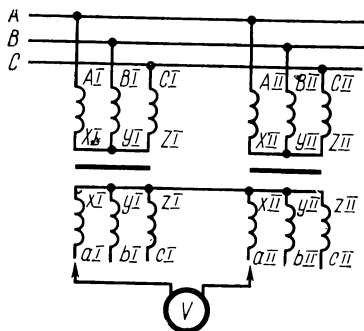


Рис. 2. Проверка одинаковости групп соединений двух трехфазных трансформаторов

моток; одинаковое напряжение короткого замыкания (допускается разность не более  $\pm 10\%$ ); номинальные мощности не выходят за пределы 3:1. При несоблюдении второго и третьего условий в обмотках параллельно включенных трансформаторов возникают уравнительные токи. При несоблюдении четвертого условия распределение нагрузки между параллельно включенными трансформаторами происходит непропорционально их номинальным мощностям.

Для включения на параллельную работу трансформаторов, удовлетворяющих перечисленным требованиям, необходимо также проверить правильность маркировки зажимов трансформаторов при пониженном напряжении. Для чего обмотку высшего напряжения

трехфазного трансформатора включают в звезду (см. рис. 1, а), к зажимам  $BN$  подводят напряжение однофазного переменного тока пониженного напряжения по сравнению с номинальным фазным напряжением, а затем вольтметром измеряют напряжения и э. д. с. между зажимами трансформатора  $U_{BY}$ ,  $E_{AX}$ ,  $C_{CZ}$ ,  $E_{AC}$ ,  $U_{AB}$  и  $U_{BC}$ . Так как по среднему стержню фазы  $B$  протекает полный магнитный поток, а по крайним стержням трансформатора фаз  $A$  и  $C$  только по половине полного магнитного потока и во всех фазах число витков одинаково, то вольтметр при правильной маркировке зажимов покажет напряжение между зажимами  $AX$  и  $CZ$ , равное половине напряжения, приложенного к обмотке  $BY$ . Напряжение  $U_{AB}=U_{BC}=1,5 U_{BY}$ . Если маркировка обмоток неправильна, показание вольтметра определяется разностью тех же э. д. с., т. е.  $U_{AB}=0,5 U_{BY}$ . Маркировку фазы  $A$  надо изменить. Маркировку обмоток низшего напряжения проверяют последовательно для каждой фазы по схеме, показанной на рис. 1, б.

Одинаковость групп соединения обмоток двух трехфазных трансформаторов проверяют измерением напряжений между одноименными зажимами этих трансформаторов (рис. 2). Если первичные обмотки двух трехфазных трансформаторов, соединенных по схеме звезда — звезда с выведенной нулевой точкой, присоединить к сети, а нулевые точки соединить, трансформаторы принадлежат к одной и той же группе, когда напряжение между всеми одноименными зажимами равно нулю, а между разноименными одинаковы и равны линейному напряжению, т. е.

$$\begin{aligned} U_{a1,b11} &= U_{a1,c11} = U_{b1,a11} = U_{b1,c11} = U_{c1,a11} = \\ &= U_{c1,b11} = \sqrt{3} U_{\phi}. \end{aligned}$$

Все фазные напряжения одного трансформатора должны быть равны каждому фазному напряжению другого трансформатора. Если этого равенства нет, трансформаторы принадлежат к разным группам и включить их на параллельную работу нельзя, так как возникающий при этом уравнивающий ток будет больше тока короткого замыкания, т. е. во много раз больше номинального тока.

## Оборудование и аппаратура

Амперметры переменного тока на 50 и 10 А . . . . .	по 3 шт.
Амперметры переменного тока на 20 и 3 А . . . . .	» 6 »
Вольтметр переменного тока на 250 В . . . . .	2 »
Вольтметр переменного тока на 100 В . . . . .	1 »
Вольтметр переменного тока на 50 В . . . . .	2 »
Трехфазный трехстержневой трансформатор мощностью 1000 В·А на 220/36 В . . . . .	2 »
Резистор проволочный 2 Ом, 40 А . . . . .	6 »
Рубильник трехполюсный 250 В, 100 В . . . . .	2 »
Автомат переменного тока АП-50 трехполюсный 220 В с электромагнитным расцепителем . . . . .	3 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 16 и 10 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	по 12 »
Провода соединительные многожильные, площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	30 »
Источник трехфазного тока 220 В, 50 Гц, мощностью 3 кВ·А	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и паспортными данным трехфазных трансформаторов.
2. Проверить правильность маркировки каждого трансформатора (первичных и вторичных обмоток).
3. Проверить принадлежность трансформаторов к одной и той же группе.
4. Собрать схему (рис. 3), включить первый трансформатор в сеть, присоединить к нему симметричную равномерную нагрузку, равную полной загрузке одного трансформатора, и записать показания приборов в таблицу.
5. Включить на параллельную работу второй трансформатор и записать распределение нагрузки между трансформаторами.
6. Отключить нагрузку и записать уравнильный ток, циркулирующий между вторичными обмотками трансформаторов.
7. Составить отчет.

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры трансформаторов, измерительных приборов и оборудования.

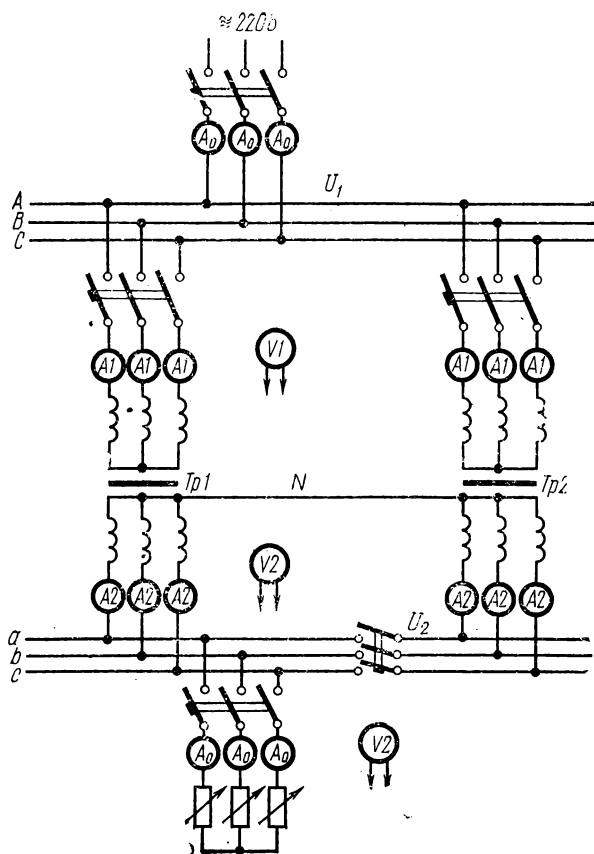


Рис. 3. Схема включения приборов для испытания параллельно работающих трехфазных трансформаторов

3. Схемы проверки правильности маркировки зажимов первичных и вторичных обмоток трансформаторов и описание метода проверки.

4. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.

5. Схема включения трансформаторов на параллельную работу.

6. Таблица распределения нагрузок между параллельно работающими трансформаторами.

7. Выводы.



## Исследование работы трехфазных трансформаторов

## а) Раздельная работа

Первичное напряжение $U_1$ , В		
Первичный ток трансформатора $Tr1$ , (A1)	Фазы	A
		B
		C
Вторичный ток трансформатора $Tr2$ , (A2)	Фазы	a
		b
		c

Вторичное напряжение  $U_2$ , В

## б) Параллельная работа

Первичное напряжение $U_1$ , В		
Общий первичный ток трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ ( $A_0$ )	Фазы	A
		B
		C
Первичный ток трансформатора $Tr1$ (A1)	Фазы	A
		B
		C
Первичный ток трансформатора $Tr2$ (A1)	Фазы	A
		B
		C

Вторичное напряжение  $U_2$ , В

Вторичный ток трансформатора $Tr1$ ( $A_2$ )	Фазы	$a$
		$b$
		$c$
Вторичный ток трансформатора $Tr2$ ( $A_2$ )	Фазы	$a$
		$b$
		$c$
Общий вторичный ток трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ ( $A_0$ )	Фазы	$a$
		$b$
		$c$

### Контрольные вопросы

1. Для какой цели трансформаторы включают на параллельную работу и какие условия при этом необходимо выполнять?
2. Как проверяют правильность маркировки зажимов первичной и вторичной обмоток трехстержневых трансформаторов?
3. Что произойдет, если на параллельную работу включить два трехстержневых трансформатора одинаковой мощности, имеющих разные значения напряжения короткого замыкания?
4. Что произойдет, если на параллельную работу включить два трансформатора, принадлежащие к разным группам соединения обмоток?

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

#### Работа № 22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛ И КОНЦОВ ФАЗНЫХ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы — научиться находить начала и концы фазных обмоток статора трехфазного асинхронного электродвигателя и правильно соединять их.

**Пояснения.** Трехфазный асинхронный электродвигатель может развивать номинальную мощность на своем валу при номинальной частоте вращения только в том случае, если три его обмотки включены правильно. При

правильном соединении обмоток двигателя трехфазного тока в звезду все начала обмоток  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  присоединяют к зажимам сети, а все концы  $C4$ ,  $C5$  и  $C6$  — к общей нулевой точке. Если хотя бы одна обмотка включена неверно, например конец соединен с сетью, а начало

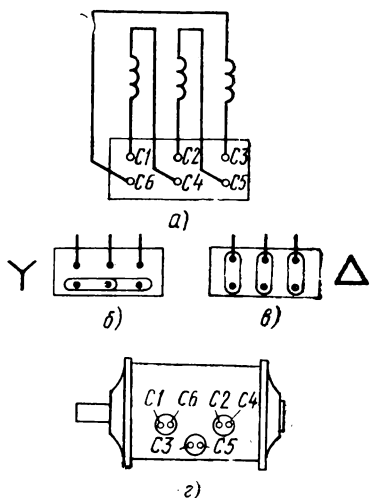


Рис. 1. Соединение обмоток статора трехфазных асинхронных двигателей и обозначение их выводов:

$a$  — схема подключения обмоток к выводному щитку,  $б$  и  $в$  — соединение обмоток в звезду и треугольник,  $г$  — выводы концов обмоток без щитка;  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  и  $C4$ ,  $C5$ ,  $C6$  — начала и концы фазных обмоток

с нулевой точкой, двигатель работать нормально не может. При правильном соединении в треугольник все начала фазных обмоток  $C1$ ,  $C2$  и  $C3$  соединяют с сетью, а концы — с началами других фаз; конец обмотки первой фазы  $C4$  соединяется с началом второй фазы  $C2$ ,  $C5$  — с  $C3$ , а  $C6$  — с  $C1$ . Схемы соединения обмоток статора

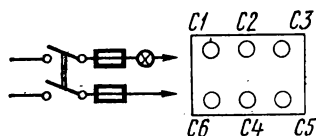


Рис. 2. Определение выводов обмоток статора трехфазного двигателя, принадлежащих к одной фазе, с помощью контрольной лампы

трехфазного электродвигателя и обозначения его выводов показаны на рис. 1.

Чтобы правильно соединить обмотки электродвигателя, следует найти выводы обмотки, принадлежащие одной и той же фазе, для чего можно воспользоваться омметром или схемой, показанной на рис. 2. Номинальное напряжение лампы  $L$  должно быть равно напряжению сети. Отыскав выводы всех трех фаз, условно присваивают одному выводу одной фазы обозначение выводов первой фазы; начало  $C1$  и конец  $C4$ . Также произвольно обозначают начало  $C2$  и конец  $C5$  второй

фазы. Чтобы определить начала и концы обмоток, первую и вторую фазы обмотки соединяют последовательно (рис. 3, *а*), т. е. *С4* соединяют с *С2*, а начало первой фазы *С1* и конец второй фазы *С5* через резистор *r* соединяют с сетью. К выводам третьей фазы присоединяют лампу или вольтметр. Если лампа загорится, сделанные произвольно обозначения выводов обмотки правильны; если лампа не загорится (рис. 3, *б*), выводы второй фазы соединены неправильно, а обозначения

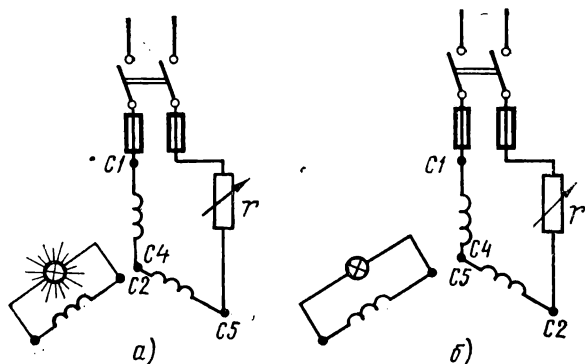


Рис. 3. Схемы соединения обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя для определения их начал и концов:

*а* — обозначение выводов первой и второй фаз (*С1—С4* и *С2—С5*) правильное — лампа горит, *б* — обозначение выводов неправильное — лампа не горит

концов соответствуют рис. 3, *б*. Обозначения концов второй фазы надо поменять местами, пересоединить обмотки к сети и снова проверить по схеме рис. 3, *а*. Затем последовательно соединяют первую и третью фазы (*С4* с *С3*), конец *С6* соединяют через резистор с сетью, а ко второй фазе присоединяют контрольную лампу. Контрольная лампа загорится, если обозначения и соединения сделаны правильно.

Определение начал и концов обмоток трехфазного двигателя по описанному выше методу основывается на том, что при прохождении переменного тока по обмоткам двигателя возникает переменный магнитный поток. Если обмотки первой и второй фаз двигателя включены правильно, возникающий магнитный поток направлен вдоль оси катушки третьей фазы, в обмотке третьей

фазы наводится э. д. с. и контрольная лампа, присоединенная к ней, горит. Если же одна из двух последовательно включенных обмоток (первой или второй фазы) соединена неверно, возникающий магнитный поток направлен поперек оси катушки третьей фазы, в результате чего в витках обмотки этой фазы э. д. с. не наводится.

## Оборудование и аппаратура

Электродвигатель 4А80А короткозамкнутый трехфазный с шестью выводами мощностью 1,1 кВт на 220/380 В, 1500 об/мин .	1 шт.
Резистор на 250 Ом . . . . .	1 »
Рубильник двухполюсный и трехполюсный на 60 А, 250 В . . . . .	2 »
Контрольная лампа на 127 В, 40 Вт с патроном и двумя концами проводов с наконечниками . . . . .	1 комп.
Вольтметр переменного тока на 150 В . . .	1 шт.
Амперметр переменного тока на 5 А . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 1,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . .	5 »
Источник однофазного переменного тока на 127/220 В, 50 Гц	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя.

2. Определить выводы обмоток, принадлежащих к одной фазе, и прикрепить к ним бирки с обозначениями начал и концов: первая фаза — *С1* и *С4*, вторая фаза — *С2* и *С5*, третья фаза — *С3* и *С6*.

3. Соединить последовательно первую и вторую фазы и подключить их через резистор к сети; к третьей фазе присоединить контрольную лампу или вольтметр и определить правильные обозначения выводов второй фазы.

4. Определить начало и конец третьей фазы.

5. Соединить обмотки двигателя в звезду, присоединить к рубильнику, пустить холостую и замерить ток холостого хода в каждой фазе. Показания амперметров записать в таблицу.

6. Перевернуть одну из фаз (включить одну обмотку неправильно), включить двигатель в сеть и проверить ток в каждой фазе. Показания записать в таблицу.

7. Составить отчет.

Таблица

**Определение начал и концов обмоток статора асинхронного  
короткозамкнутого электродвигателя трехфазного тока**

Обмотки	Соединение	Выводы	Ток холостого хода, А
Фаза А: C1—C4 Фаза В: C2—C5 Фаза С: C3—C6	По схеме рис. 3, а (лампа горит)	Обозначения правильные	
C1—C4 C2—C5 C3—C6	По схеме рис. 3, б (лампа не горит)	Обозначения неправильные	

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электродвигателя, приборов и другого оборудования.
3. Схема соединения выводов обмотки статора с зажимами к щитку (см. рис. 1, а).
4. Таблица с результатами измерений.
5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Как следует включить обмотки статора трехфазного двигателя, чтобы получить соединение звездой и треугольником?
2. Как определить концы обмотки, принадлежащие одной фазе?
3. Как определить начала и концы обмоток статора каждой фазы трехфазного асинхронного двигателя?
4. Есть ли разница в значениях фазных токов холостого хода при правильном и неправильном соединении обмоток трехфазного асинхронного двигателя?

### **Работа № 23. СБОРКА СХЕМ И ВКЛЮЧЕНИЕ В СЕТЬ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРТКОЗАМКНУТЫМИ И ФАЗНЫМИ РОТОРАМИ И РЕЗИСТОРНЫМ ПУСКОМ**

Цель работы — ознакомиться со схемами включения в сеть трехфазных асинхронных двигателей: с прямым пуском короткозамкнутых и с резисторным пус-

ком фазных; выявить назначения пусковых резисторов; научиться сборке схем и способам пуска асинхронных двигателей.

**Пояснения.** Чтобы пустить асинхронный короткозамкнутый двигатель, нужно присоединить его обмотку к сети. Для трехфазного двигателя питающая сеть также должна быть трехфазной. В качестве аппаратуры осуществляющей включение двигателя в сеть используют трехфазные рубильники, трехфазные автоматические выключатели, магнитные пускатели или контакторы. Монтажная и принципиальная схемы включения трехфазного короткозамкнутого электродвигателя показаны на рис. 1.

Подведение электроэнергии к двигателю  $M$  осуществляется при помощи трехфазного трехполюсного рубильника  $P$  через плавкие предохранители  $Пр$ , установленные в каждой фазе, силовые контакты магнитного пускателя  $K$  и нагревательные элементы теплового реле  $РТ$ . При нажатии на кнопку «Пуск» —  $КнП$  по катушке магнитного пускателя  $K$  потечет ток, катушка втянет сердечник, на котором закреплены мостиковые силовые контакты, и двигатель наберет частоту вращения, определяемую его нагрузкой. Для отключения двигателя от сети достаточно нажать на кнопку «Стоп»

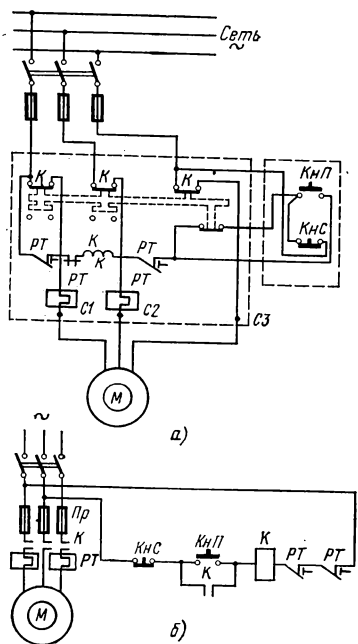


Рис. 1. Схема включения асинхронного короткозамкнутого двигателя с помощью магнитного пускателя:

$a$  — монтажная,  $b$  — принципиальная

—  $КнС$ , при этом цепь тока в катушке пускателя разомкнется, его силовые контакты разомкнут цепь и двигатель остановится. При коротком замыкании, опрокидывании двигателя или заклинивании его рабочих органов плавкие вставки предохранителя перегорают и двигатель от-

ключается. При длительной перегрузке для защиты двигателя от перегрева срабатывает тепловая защита, размыкая контакты теплового реле, что также приводит к отключению двигателя.

Для изменения направления вращения двигателя достаточно поменять местами две фазы, т. е. переключить два провода, подходящие к двигателю от сети.

На рис. 2 показаны схемы включения трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором, в цепь ко-

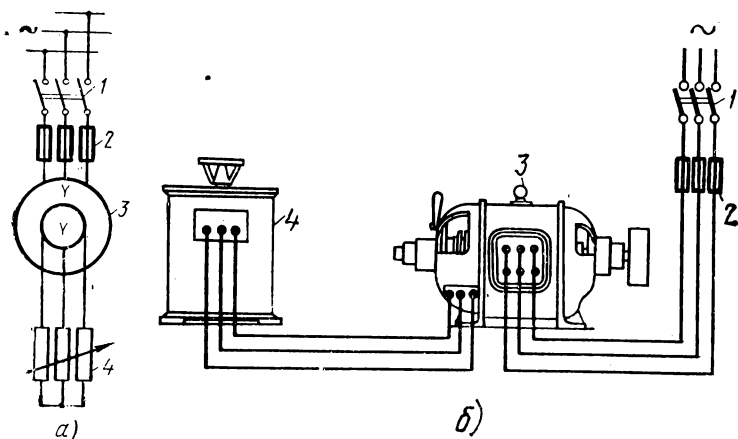


Рис. 2. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором и пусковым резистором:

*а* — принципиальная, *б* — монтажная; 1 — рубильник трехполюсный, 2 — плавкие предохранители, 3 — электродвигатель, 4 — пусковой реостат

торого включен трехфазный пусковой резистор 4. Включение двигателя в сеть производится трехполюсным рубильником 1. Сопротивление пускового резистора при этом введено полностью, что позволяет уменьшить пусковой ток якоря и одновременно увеличить пусковой вращающий момент двигателя. Величина пускового вращающего момента зависит от величины активного сопротивления пускового резистора и параметров электродвигателя. Изменяя сопротивление резистора в цепи обмотки ротора, регулируют частоту вращения вала двигателя.



## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	3 шт.
Амперметр переменного тока на 1 А . . . . .	1 »
Вольтметр переменного тока на 450 В . . . . .	1 »
Электродвигатель асинхронный короткозамкнутый трехфазного тока 4А80А на 220/380 В, мощностью 0,75 кВт, 960 об/мин . . . . .	1 »
Электродвигатель асинхронный трехфазного тока с фазным ротором АК-51-4 на 220/380 В, мощностью 2,8 кВт, 1440 об/мин . . . . .	1 »
Трехфазный пусковой резистор ПР-17,5, 500 В	1 »
Рубильник трехполюсный на 60 А, 500 В . . . .	2 »
Рубильник однополюсный на 5 А . . . . .	1 »
Магнитный пускатель переменного тока ПМЕ-022 с катушкой на 380 В для двигателя 0,75 кВт . . . . .	1 »
Двухкнопочная станция управления магнитным пускателем . . . . .	1 »
Тахометр . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . .	20 »
Источник переменного трехфазного тока 380/220 В, 50 Гц, 5 кВт	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с короткозамкнутым и фазным электродвигателями, записать их паспортные данные.
2. Ознакомиться с магнитным пускателем и его принципом действия, записать технические данные аппаратуры, предназначенной для выполнения работы.
3. Собрать схему включения в сеть асинхронного трехфазного короткозамкнутого электродвигателя с магнитным пускателем (см. рис. 1). Пустить двигатель вхолостую, отключить его.
4. Собрать схему включения в сеть трехфазного асинхронного двигателя с фазной обмоткой ротора (см. рис. 2), пустить двигатель вхолостую при полностью введенном сопротивлении резистора в цепь обмотки ротора, постепенно вывести сопротивление пускового резистора. Замерить ток холостого хода при помощи амперметра на 2 А, раскоротив его обмотку однополюсным рубильником. Замерить тахометром частоту вращения вала электродвигателя. Отключить двигатель от сети.
5. Замерить сопротивления обмоток ротора и пускового резистора и записать их значения.

## **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры электродвигателей, электроизмерительных приборов и другого оборудования и аппаратуры.
3. Схема включения в сеть трехфазных асинхронных двигателей (короткозамкнутого и фазного).
4. Результаты измерений тока холостого хода.
5. Изменение направления вращения вала двигателя.
6. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Во сколько раз пусковой ток асинхронного короткозамкнутого двигателя больше номинального и почему?
2. Каково назначение магнитного пускателя?
3. По каким признакам можно отличить фазный двигатель от короткозамкнутого?
4. Для какой цели при включении фазного двигателя в сеть применяют пусковой резистор?

## **Работа № 24. СБОРКА СХЕМЫ И ВКЛЮЧЕНИЕ В СЕТЬ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ОБМОТОК СО ЗВЕЗДЫ НА ТРЕУГОЛЬНИК**

Цель работы — ознакомиться со способом включения в сеть трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя переключением его обмоток со звезды на треугольник.

**Пояснения.** Чтобы пустить в ход асинхронный короткозамкнутый двигатель, нужно присоединить его обмотки к сети, находящейся под напряжением. В момент пуска сила тока превышает его номинальное значение в 6—7 раз и этот бросок тока вызывает увеличение потерь напряжения в питающих проводах, в силовых трансформаторах, особенно, если мощность двигателя соизмерима с мощностью трансформатора, а также понижает напряжение ламп накаливания и других электродвигателей, присоединенных к тому же трансформатору и находящимся на одной питающей линии.

Чтобы уменьшить влияние пусковых токов на уровень напряжения, приходится увеличивать сечение проводов и мощность трансформаторов. Для уменьшения пускового тока обмотки двигателя включают в звезду. Этот способ можно применять, если напряжение, на кото-

рое рассчитан электродвигатель, при соединении его обмоток в треугольник равно напряжению сети. В момент пуска обмотки двигателя включают в звезду, что увеличивает эквивалентное сопротивление обмотки статора в 1,73 раза и одновременно уменьшает напряжение, подводимое к фазным обмоткам двигателя также в 1,73 раза (в  $\sqrt{3}$ ) в результате чего пусковой ток из сети уменьшается в 3 раза.

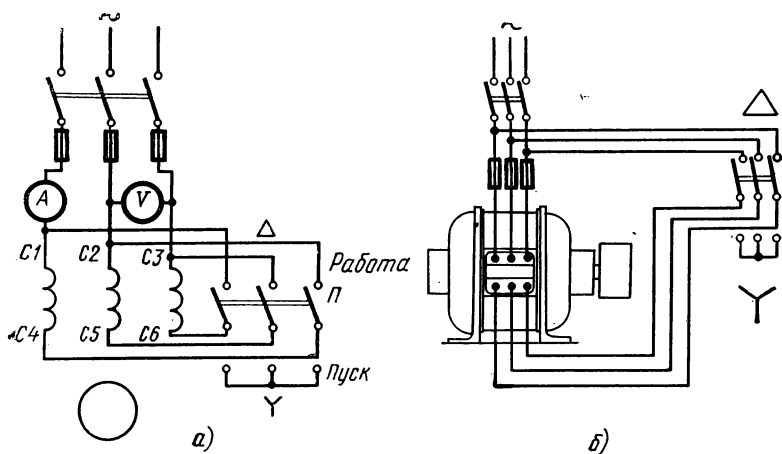


Рис. 1. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя переключением обмоток статора со звезды на треугольник:

а — принципиальная, б — монтажная

Уменьшение силы тока в три раза при пуске двигателя с включением его обмоток в звезду по сравнению с включением в треугольник можно понять, если рассматривать силу линейного тока при соединении обмоток в треугольник ( $I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}$ ) и при соединении в звезду ( $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$ ). Так как при соединении в звезду напряжение, подведенное в каждой фазе уменьшено на  $\sqrt{3}$  раз ( $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$ ), линейный ток станет в три раза меньше, чем при соединении обмоток двигателя в треугольник. При этом напряжение сети остается неизменным. Такой способ применяют при пуске холостую или при нагрузке не более 25% номинальной. Когда угловая скорость (частота) вращения двигателя приблизится к номинальной, обмотки переключают в треугольник и двигатель можно загружать на полную мощность.

В настоящее время промышленность СССР освоила выпуск электродвигателей четвертой единой серии мощностью от 0,55 кВт и выше с соединением обмоток в треугольник при напряжении 380 В, специально предназначенных для переключения обмоток со звезды на треугольник при пуске двигателя. Переключая обмотки двигателя со звезды на треугольник (рис. 1), следует иметь в виду, что при понижении напряжения в  $\sqrt{3}$  раза пусковой момент уменьшается в 3 раза; в этом случае двигатели пускать под полной нагрузкой нельзя.

### Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . . . .	1 шт.
Вольтметр переменного тока на 450 В . . . . .	1 »
Электродвигатель короткозамкнутый трехфазного тока 4А80А на 380/660 В мощностью 0,75 кВт, 960 об/мин . . . . .	1 »
Трехполюсный пакетный переключатель со звезды на треугольник на 60 А, 500 В . . . .	1 »
Рубильник трехполюсный на 60 А, 450 В . . . .	3 »
Автоматический трехполюсный выключатель АК50М или АК63М переменного тока, 50 Гц с расцепителями на 8 и 12,5 А . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . .	12 »
Источник трехфазного переменного тока на 380/220 В, 50 Гц, 5 кВт	

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с короткозамкнутым электродвигателем, записать данные его паспорта.
2. Ознакомиться с автоматическим выключателем и переключателем со звезды на треугольник, составить их схемы.
3. Собрать схему включения в сеть асинхронного короткозамкнутого двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник (см. рис. 1), измерить пусковые токи, результаты измерений записать в таблицу.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электродвигателей (тип, номинальная мощность, напряжение, ток, схема соединения, частота тока, режим работы, частота вращения, к. п. д., cos φ,

Т а б л и ц а

**Пуск асинхронного короткозамкнутого двигателя  
переключением обмоток со звезды на треугольник**

U, В	Пуск на Δ		Пуск на Υ		Переключение с Υ на Δ	
	I, А	продолжительность, с	I, А	продолжительность, с	I, А	продолжительность, с

завод-изготовитель и его товарный знак, заводской номер, год выпуска, масса двигателя, ГОСТ), измерительных приборов и другого оборудования.

3. Схема включения в сеть трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник.

4. Таблица с результатами испытаний.

5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какими способами можно уменьшить пусковой ток электродвигателя?

2. Какие аппараты защиты двигателя встраиваются в автоматический выключатель?

3. Почему при включении обмотки двигателя в звезду пусковой ток уменьшается в 3 раза?

4. Какой величины может быть пусковой ток фазного асинхронного двигателя, если в цепь ротора включено правильно выбранное активное сопротивление?

### **Работа № 25. ВКЛЮЧЕНИЕ В СЕТЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ТРЕХФАЗНОГО ТОКА И РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ НА ЕГО ЗАЖИМАХ**

Цель работы — ознакомиться с устройством синхронного генератора с электромашиным возбудителем и его основными характеристиками; снять характеристики холостого хода и внешнюю; включить генератор в сеть на параллельную работу.

**Пояснения.** Синхронный генератор трехфазного тока имеет статор, служащий якорем, в обмотке которого индуцируется э. д. с. и ротор, называемый индуктором, обмотка которого создает основной магнитный поток возбуждения. В трехфазных обмотках статора наводимые синусоидальные э. д. с. сдвинуты по фазе на угол

$2\pi/3$  радиана по отношению друг к другу и при включении нагрузки создают соответствующие рабочие токи. Ротор представляет собой электромагнит, по катушкам которого протекает постоянный ток. Постоянный ток в синхронных генераторах поступает от небольшого собственного генератора постоянного тока — возбuditеля, чаще всего установленного на одном валу с синхронным генератором, или от выпрямителя. Э. д. с., наводимую в обмотках каждой фазы статора, на основании закона электромагнитной индукции определяют по формуле

$$E = 4,44 \omega k_{об} f \Phi,$$

где  $\omega$  — число витков обмотки одной фазы статора;  $k_{об}$  — обмоточный коэффициент;  $f$  — частота переменного тока, Гц;  $\Phi$  — магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения, Вб.

Частота переменного тока синхронного генератора зависит от скорости (частоты) вращения ротора. Чтобы изменить э. д. с. генератора, надо в соответствии с приведенной формулой изменить магнитный поток  $\Phi$ , который зависит от тока возбуждения в обмотке ротора.

Характеристикой холостого хода синхронного генератора называют зависимость э. д. с. генератора от тока возбуждения  $I_v$  при отсутствии нагрузки и при номинальной скорости (частоте) вращения. Схема включения приборов для снятия характеристики холостого хода синхронного генератора показана на рис. 1, а.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения вращает синхронный генератор, работающий вхолостую. Частота вращения поддерживается все время номинальной. Первый отсчет производится при отсутствии тока, в обмотке возбуждения — рубильник  $P_v$  отключен. Затем рубильник  $P_v$  замыкают, и ток возбуждения постепенно повышается (сопротивление регулировочного реостата в цепи возбуждения сначала максимум, а затем постепенно уменьшается). Ток увеличивают до тех пор, пока на зажимах генератора не возникает напряжение на 20% больше номинального. После этого сопротивление регулировочного реостата постепенно увеличивают (ток возбуждения  $I_v$  уменьшают) и, доведя его до максимума, отключают рубильник  $P_v$ . При снятии характеристики холостого хода реостат в

цепи возбуждения для регулирования тока возбуждения можно двигать только в одну сторону при повышении напряжения и только в обратную сторону при по-

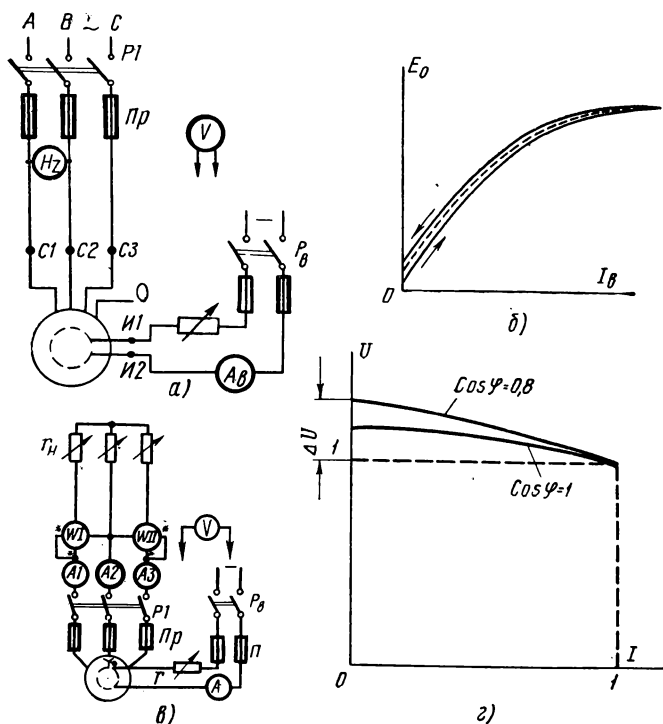


Рис. 1. Испытания синхронного генератора:

а и б — схема для снятия характеристики холостого хода и характеристика холостого хода, в и г — схема для снятия внешних характеристик и внешняя характеристика

нижении напряжения. Результаты измерения записывают в табл. 1 и на их основании строят характеристику холостого хода (рис. 1, б).

Таблица 1

Характеристика холостого хода синхронного генератора

н, об/мин	$\Omega$ , рад/с	$f$ , Гц	$I_B$ , А	$U_{AB}$ , В	Примечания

Если характеристика холостого хода снята правильно, на графике получается две ветви: одна — восходящая — идет ниже, а вторая — нисходящая — выше. Характеристика холостого хода наглядно показывает часть петли гистерезиса магнитопровода синхронной машины.

С увеличением подключенной к синхронному генератору нагрузки напряжение на выводах генератора уменьшается. При проведении опыта для снятия внешней характеристики необходимо поддерживать неизменными скорость (частоту) вращения ротора, коэффициент мощности  $\cos \varphi$  и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ . Уменьшение напряжения на выводах генератора с ростом нагрузки объясняется тем, что в активном и индуктивном сопротивлениях обмоток якоря генератора возникают внутренние потери напряжения, а также тем, что магнитное поле якоря размагничивает основное магнитное поле ротора, что происходит при активной и индуктивной нагрузках. Если к синхронному генератору подключить емкостную нагрузку, напряжение на выводах генератора начнет повышаться.

Зависимость напряжения  $U$  на выводах генератора от тока  $I$  нагрузки называется внешней характеристикой генератора. Для снятия ее необходимо собрать схему, показанную на рис. 1, в, а затем включить нагрузку. Скорость (частоту) вращения генератора следует поддерживать номинальной. В цепи возбуждения с помощью регулировочного реостата устанавливают такой ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , который обеспечивает номинальное напряжение на зажимах генератора при полной нагрузке, а затем постепенно разгружают генератор. Показания приборов записывают в табл. 2.

Таблица 2

Внешняя характеристика синхронного генератора

Характер нагрузки	$f$ , Гц	$I_{\text{в}}$ , А	Ток статора, А			$P$ , Вт	$U$ , В	$\cos \varphi$
			$I_A$	$I_B$	$I_C$			

Рекомендуется снять две внешние характеристики при чисто активной ( $\cos \varphi = 1$ ) и при активно-индуктивной нагрузках. На основании измерений и вычислений



по данным табл. 2 строят внешние характеристики генератора (рис. 1, г), где  $\Delta U$  — повышение напряжения на зажимах генератора при снятии всей нагрузки.

Для включения синхронного генератора на параллельную работу с другим синхронным генератором или с сетью необходимо выполнить следующие условия:

напряжение на выводах подключаемого генератора должно быть равно напряжению другого работающего генератора или сети;

частота подключаемого генератора должна быть равна частоте сети;

э. д. с. всех фаз подключаемого генератора должны быть противоположны (по фазе) напряжениям соответствующих фаз работающего генератора или сети;

подключаемый на параллельную работу генератор должен иметь такое же чередование фаз, как и работающий генератор, т. е. за фазой *A* должна следовать фаза *B*, а затем фаза *C*.

Для включения на параллельную работу сначала при помощи первичного двигателя приводят генератор во вращение, затем включают ток возбуждения и при помощи вольтметра и частотометра устанавливают э. д. с. и частоту подключаемого генератора, равными напряжению и частоте сети. Э. д. с. регулируют реостатом в цепи возбуждения, а частоту — изменением скорости (частоты) вращения первичного двигателя. Третье и четвертое условия включения на параллельную работу выполняют с помощью синхроскопа и нулевого вольтметра. Синхроскоп — специальный прибор, предназначенный для синхронизации синхронных генераторов, проверяющий выполнение третьего условия и показывающий, в какую сторону нужно изменять скорость (частоту) вращения подключаемого генератора. Нулевой вольтметр позволяет точно определить момент, в который следует включить генератор на параллельную работу. Стрелка нулевого вольтметра при этом должна подходить к нулю.

### Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 10 А . . . .	1 шт.
Амперметр переменного тока на 5 А . . . .	4 »
Вольтметр переменного тока на 250 В . .	2 »
Вольтметр «нулевой» переменного тока на 250 В . . . . .	1 »

Ваттметр щитовой трехфазный на 380 В, 5 А . . . . .	2 шт.
Синхроноскоп на 380 В, 50 Гц . . . . .	1 »
Рубильники двух- и трехполюсные на 500 В, 60 А . . . . .	по 1 »
Реостат регулировочный на 5 А, 100 Ом . . . . .	4 »
Синхронный генератор на 380/220 В, 2 кВА, 3000 об/мин . . . . .	1 »
Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения на 110 В, 2,5 кВт, 3000 об/мин . . . . .	1 »
Реостат регулировочный для двигателя по- стоянного тока на 5 А, 100 Ом . . . . .	1 »
Тахометр до 4000—6000 об/мин . . . . .	1 »
Частотомер щитовой стрелочный на 220 В, 45—55 Гц . . . . .	2 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м	20 »
Источники постоянного тока 115 В, 3 кВт и переменного трехфазного тока 380/220 В, 5 кВт	

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством и конструктивными особенностями синхронного генератора.

2. Собрать схему для снятия характеристики холостого хода (см. рис. 1, а) и снять характеристику, результаты испытаний занести в табл. 7. и по ним построить характеристику.

3. Собрать схему для снятия внешних характеристик (см. рис. 1, в), снять характеристику, результаты измерений занести в табл. 2 и по ним построить характеристики.

4. Включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью \*.

5. Составить отчет.

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.

2. Основные параметры синхронного генератора, приборов и оборудования.

3. Схема включения приборов для снятия характеристики холостого хода синхронного генератора, табл. 1

---

\* Схема включения синхроноскопа, вольтметров и частотомеров должна быть собрана постоянно.

с результатами измерений и характеристика, построенная по данным табл. 1.

4. Схема включения приборов для снятия внешних характеристик, табл. 2 с результатами измерений и характеристики, построенные по данным табл. 2.

5. Перечислить условия включения синхронного генератора на параллельную работу.

6. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Каково основное назначение синхронного генератора?
2. Как можно изменять напряжение на зажимах синхронного генератора, работающего на самостоятельную нагрузку?
3. Каково соотношение между скоростью (частотой) вращения генератора и частотой тока, вырабатываемого им?
4. Почему при увеличении нагрузки напряжение на зажимах синхронного генератора уменьшается?
5. Что такое внешняя характеристика синхронного генератора?
6. Что необходимо изменять в цепях синхронного генератора, чтобы напряжение на зажимах генератора осталось неизменным при изменении нагрузки?
7. Какие операции необходимо выполнить при включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью?

### **Работа № 26. ВКЛЮЧЕНИЕ В СЕТЬ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕГО ЗАЖИМАХ**

Цель работы — ознакомиться с устройством и основными характеристиками генератора постоянного тока параллельного возбуждения; снять характеристики холостого хода и внешнюю.

**Пояснения.** Генератор постоянного тока преобразует механическую энергию вращения в электрическую, состоит из неподвижной части — основы машины с электромагнитами постоянного тока, вращающегося якоря, к которому подводится механическая энергия и в котором индуцируется переменная э. д. с. и коллектора со щетками, преобразующего переменную э. д. с. в постоянную. Генератор параллельного возбуждения характеризуется тем, что его обмотка возбуждения включена параллельно главным зажимам, т. е. параллельно обмотке якоря. Для регулирования напряжения на зажимах генератора изменяют магнитный поток машины, зависящий от тока возбуждения, который устанавливают с помощью реостата, или изменяют скорость

(частоту) вращения первичного двигателя. При испытании генератора параллельного возбуждения снимают характеристики холостого хода и внешнюю.

Характеристика холостого хода — это зависимость э. д. с. генератора  $E_0$  от тока возбуждения  $I_B$  при отсутствии тока нагрузки ( $I=0$ ), т. е. при разомкнутой внешней цепи и при неизменной номинальной ско-

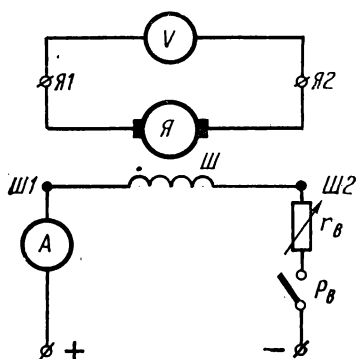


Рис. 1. Схема включения измерительных приборов для снятия характеристики холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения при питании обмотки возбуждения от постороннего источника тока:

Я — якорь генератора, Ш — обмотка возбуждения генератора,  $r_B$  — реостат в цепи возбуждения,  $P_B$  — рубильник в цепи возбуждения

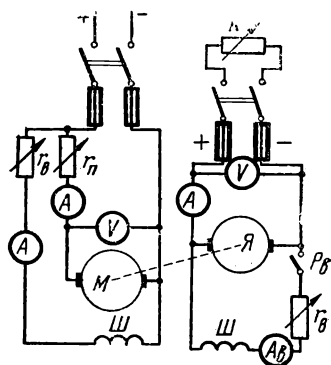


Рис. 2. Схема включения измерительных приборов, электродвигателя и генератора постоянного тока параллельного возбуждения:

М — двигатель, Я — якорь генератора, Ш — обмотка параллельного возбуждения,  $r_П$  — реостат пусковой,  $r_B$  — реостат в цепи возбуждения,  $R$  — сопротивление нагрузки;  $P_B$  — рубильник в цепи возбуждения

рости (частоте) вращения. Эту характеристику (рис. 1) рекомендуется снимать, отсоединив обмотку возбуждения от якоря испытуемого генератора и пропуская ток возбуждения от постороннего источника постоянного тока. В результате получается независимое возбуждение. Для снятия характеристики холостого хода сначала необходимо запустить генератор при помощи вспомогательного электродвигателя (рис. 2) и поддерживать его скорость (частоту) вращения неизменной.

Начинают снимать характеристику холостого хода при разомкнутом рубильнике  $P_{\text{в}}$ , т. е. при отсутствии электрического тока в обмотке возбуждения генератора. Вольтметр показывает э. д. с. генератора, наведенную в обмотке якоря магнитным потоком остаточного магнетизма:

$$E_0 = k\Omega\Phi,$$

где  $k = pN/(2\pi a)$  — постоянная машины постоянного тока;  $p$  — число пар полюсов;  $N$  — число активных проводников обмотки якоря;  $a$  — число пар параллельных ветвей;  $\Omega$  — частота вращения, равна  $2\pi n/60$ , 1/с.

Затем рубильник  $P_{\text{в}}$  замыкают, сопротивление  $r_{\text{в}}$  в цепи обмотки возбуждения генератора постепенно уменьшают, благодаря чему ток возбуждения возрастает и снимают восходящую ветвь характеристики. Доведя напряжение на выводах генератора до  $1,2 U_{\text{н}}$ , начинают увеличивать сопротивление реостата  $r_{\text{в}}$  генератора, вследствие чего ток возбуждения уменьшается, и снимают нисходящую ветвь характеристики холостого хода. Скорость (частоту) вращения генератора измеряют тахометром. При снятии характеристики холостого хода движок реостата можно двигать только в одну сторону: при снятии восходящей ветви — только уменьшать сопротивление  $r_{\text{в}}$ , а при снятии нисходящей — только увеличивать сопротивление  $r_{\text{в}}$ .

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения — это зависимость напряжения  $U$  на зажимах генератора от силы тока  $I$  нагрузки при неизменных скорости (частоте) вращения  $\Omega$  и сопротивлении резистора (см. рис. 2). При холостом ходе устанавливают такой ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , при котором напряжение  $U$  на зажимах генератора равно номинальному, а затем включают нагрузку рубильником  $P$  и постепенно увеличивают ток нагрузки  $I$  до номинального  $I_{\text{н}}$ .

## Оборудование и аппаратура

Амперметры постоянного тока на 10 и 2 А	по 2 шт.
Вольтметр постоянного тока на 150 В . . .	2 »
Реостат нагрузочный на 10 А, 30 Ом . . .	1 »
Реостат пусковой на 15 А, 8 Ом . . . . .	1 »
Реостат возбуждения на 2 А, 60 Ом . . . .	2 »
Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения на 110 В, 1 кВт, 1000 об/мин	1 »

Генератор постоянного тока параллельного возбуждения на 115 В, 0,8 кВт, 1000 об/мин . . . . .	1 шт.
Рубильник двухполюсный на 250 В, 60 А .	2 »
Рубильник однополюсный на 250 В, 30 А . .	1 »
Тахометр 0—2000 об/мин или 0—300 рад/с	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м .	28 »
Источник постоянного тока на 115 В, 6 кВт	1 »

Т а б л и ц а 1

**Характеристика холостого хода генератора постоянного тока при независимом возбуждении**

$I_B$ , А	$E_0$ , В	$n$ , об/мин	$\Omega$ , 1/с	$U_0/U_N$ 100%	Примечания

Т а б л и ц а 2

**Внешняя характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения**

$I$ , А	$I_B$ , А	$U$ , В	$n$ , об/мин	$\Omega$ , 1/с	$P=IU$ , Вт	Примечания

**Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с устройством генераторов параллельного возбуждения.
2. Собрать схему включения приборов (см. рис. 1) для снятия характеристики холостого хода генератора параллельного возбуждения. Снять характеристику, результаты измерений записать в табл. 1 и построить по ним характеристику.
3. Собрать схему для снятия внешней характеристики генератора параллельного возбуждения (см. рис. 2), снять характеристику, результаты измерений записать в табл. 2 и построить по ним характеристику.
4. Составить отчет.

**Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры генератора постоянного тока, приборов и оборудования.

3. Схема включения приборов для снятия характеристики холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения (см. рис. 1), табл. 1 с результатами измерений и построенная по ним характеристика.

4. Схема включения приборов для снятия внешней характеристики генератора параллельного возбуждения (см. рис. 2), табл. 2 с результатами измерений и построенная по ним характеристика.

5. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое генератор постоянного тока и как он устроен?
2. Как в генераторе постоянного тока индуцируется э. д. с.?
3. Какими способами можно регулировать напряжение на зажимах генератора постоянного тока?
4. Почему напряжение на выводах генератора параллельного возбуждения с ростом нагрузки падает?
5. По каким признакам можно судить о том, что генератор постоянного тока непригоден для дальнейшей эксплуатации?

### **Работа № 27. ВКЛЮЧЕНИЕ В СЕТЬ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЕГО СКОРОСТИ (ЧАСТОТЫ) ВРАЩЕНИЯ**

Цель работы — научиться пускать в ход двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, регулировать скорость (частоту) его вращения, останавливать и изменять направление вращения; ознакомиться с рабочими характеристиками двигателей.

**Пояснения.** Двигатель постоянного тока преобразует электрическую энергию, подводимую из сети, в механическую энергию вращения, снимаемую с его вала, и состоит из станины, на которой укреплены электромагниты постоянного тока, создающие основной магнитный поток машины, и якоря, в обмотке которого наводится э. д. с. На валу двигателя расположен коллектор, к которому через щетки подводится постоянный ток.

Пуск электродвигателя постоянного тока производится подключением его обмоток к сети двухполюсным рубильником  $P$  (рис. 1). В обмотке параллельного возбуждения устанавливается максимальный ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , который обеспечивает получение максимального магнитного потока  $\Phi$ . Для этого сопротивление ре-

остата  $r$ , включенного в цепь обмотки возбуждения электродвигателей параллельного возбуждения, делают равным нулю. Ток в обмотке якоря двигателя параллельного возбуждения определяют по закону Ома

$$I = \frac{U - E}{r_{\text{я}} + r_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение сети, В;  $E$  — противоэлектродвижущая сила, развиваемая якорем при вращении, В;  $r_{\text{я}}$  — электрическое сопротивление обмотки якоря, Ом;  $r_{\text{п}}$  — электрическое сопротивление пускового реостата, Ом.

При пуске электродвигателя, когда якорь еще неподвижен,  $E=0$ , так как  $\Omega=0$  и

$$E = k\Omega\Phi. \quad (2)$$

Если скорость вращения вала электродвигателя измерена тахометром, шкала которого проградуирована во внесистемных единицах измерения — числах оборотов в минуту, формулу (2) заменяют следующей:

$$E = Cn\Phi, \quad (3)$$

здесь  $C = \frac{pN}{60a}$  — постоянная машины постоянного тока при измерении скорости вращения, об/мин;  $n$  — скорость (частота) вращения, об/мин.

Сопротивление пускового реостата подбирают так, чтобы сила тока при пуске была бы не более чем в 1,5–2,5 раза больше номинального тока двигателя. В процессе пуска сопротивление пускового реостата постепенно уменьшают. После окончания пуска скорость (частота) вращения двигателя минимальна. Для увеличения ее надо уменьшить ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ .

Напряжение сети, подведенное к двигателю, равно сумме противоэлектродвижущей силы обмотки якоря и падения напряжения на сопротивлении, включенном в цепь якоря

$$U = E + I_{\text{я}}r_{\text{я}}, \quad (4)$$

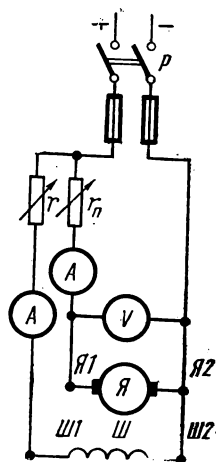


Рис. 1. Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

$r$  — реостат в цепи возбуждения,  $r_{\text{п}}$  — пусковой реостат,  $\text{Я}$  — обмотка якоря,  $\text{Ш}$  — обмотка параллельного возбуждения



где  $I_{\text{я}}$  — сила тока в цепи якоря, А;  $r_{\text{я}}$  — электрическое сопротивление в цепи якоря, Ом.

Так как  $E$  определяется выражением (2), и, учтя уравнение (4) можно получить уравнение скоростной характеристики двигателя

$$\Omega = \frac{E}{k\Phi} = \frac{U - I_{\text{я}}r_{\text{я}}}{k\Phi} \quad (5)$$

или по формуле (3)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}r_{\text{я}}}{C\Phi},$$

где  $\Omega$  — скорость (частота) вращения вала двигателя, 1/с;  $n$  — скорость (частота) вращения вала двигателя, об/мин.

Отсюда следует, что чем меньше магнитный поток, тем больше скорость (частота) вращения якоря двигателя.

Для остановки двигателя снимают нагрузку, в цепи параллельной обмотки возбуждения уменьшают сопротивление реостата  $r_{\text{в}}$ , что приводит к увеличению тока возбуждения, возрастанию магнитного потока и снижению скорости (частоты) вращения, а затем вводят пусковой реостат и рубильником или автоматом отключают двигатель от сети. Чтобы изменить направление вращения электродвигателя, нужно изменить направление тока только в обмотке якоря, оставляя неизменным направление тока в параллельной обмотке возбуждения, либо изменить направление тока только в обмотке возбуждения, не меняя направление тока в обмотке якоря. Обычно из-за того что при размыкании цепи возбуждения возникает большая э. д. с. самоиндукции, вызывающая искрение контактов, изменяют направление тока в обмотке якоря.

При работе электродвигателя с увеличением нагрузки  $P_2$  на валу двигателя изменяются потребляемая мощность  $P_1$ , скорость (частота) вращения  $\Omega$ , вращающий момент  $M$ , ток якоря  $I_{\text{я}}$  и коэффициент полезного действия  $\eta$ . Зависимости, выражающие изменение этих величин с изменением мощности на валу двигателя, называются рабочими характеристиками. Следует помнить что к. п. д.,  $P_2$  и  $P_1$  имеют следующие соотношения:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad P_2 = M\Omega, \quad (6)$$

где  $P_1$  — мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;  $P_2$  — мощность на валу, Вт;  $M$  — вращающий момент, Н·м;  $\Omega$  — частота вращения, 1/с.

Основной характеристикой электродвигателя является механическая характеристика, т. е. зависимость скорости (частоты) вращения вала двигателя  $n$  (об/мин) или  $\Omega$  (1/с) от величины вращающего момента  $M$  (Н·м). Эта зависимость для двигателей параллельного возбуждения выражается в следующем виде:

$$\Omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{r}{(k\Phi)^2}, \quad (7)$$

где  $U$  — напряжение сети, В;  $k$  — постоянная двигателя ( $k = \frac{pN}{2\pi a}$ );  $\Phi$  — магнитный поток, Вб;  $M$  — вращающий момент, Н·м;  $r$  — суммарное сопротивление всей цепи якоря двигателя с пускорегулировочным реостатом, Ом.

Если скорость  $n$  (частота) вращения измерена в несистемных единицах — об/мин, а вращающий момент  $M$  — в кгс·м, мощность на валу определяют в киловаттах по формуле

$$P_2 = \frac{Mn}{975}. \quad (8)$$

Зависимость скорости (частоты) вращения вала двигателя от вращающего момента (об/мин) определяют по более сложной формуле

$$n = \frac{U}{C\Phi} - M \frac{r}{kC\Phi^2}, \quad (9)$$

где  $C$  — коэффициент, равный  $pN/(60a)$ , а остальные величины те же, что и в формуле (7).

При разных сопротивлениях в цепи якоря получают несколько реостатных механических характеристик, для снятия которых нужно включить приборы по схеме, показанной на рис. 1. Скорость (частоту) вращения измеряют тахометром. Тормозящий момент создаваемый при помощи тормоза, вычисляют измерением тормозной силы  $F$  (Н) и плеча  $l$  (м), к которому приложена эта сила. Вращающий момент двигателя, равный тормозящему, в установившемся режиме определяется по формуле

$$M = Fl. \quad (10)$$

## Оборудование и аппаратура

Амперметры постоянного тока М340 на 20 и 3 А . . . . .	по 1 шт.
Вольтметр постоянного тока М340 на 150 В . . . . .	1 »
Реостат пусковой на 20 А, 100 Ом . . . . .	1 »
Реостат регулирующий на 20 А, 3 Ом . . . . .	1 »
Реостат регулирующий на 2 А, 20 Ом . . . . .	1 »
Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения на 110 В, 1 кВт, 1600 об/мин . . . . .	1 »
Тормоз ленточный или электромагнитный с динамометром . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	12 »
Источник постоянного тока на 115 В, 4 кВт . . . . .	

Таблица

Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

№ опыта	U, В	I, А	P, Вт	n, об/мин	ω, 1/с	F, Н	l, м	M, Н·м	P <sub>а</sub> , Вт	η, %	Примечание

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией и схемами двигателей постоянного тока параллельного возбуждения.
2. Собрать схему (см. рис. 1).
3. Запустить двигатель параллельного возбуждения и при холостом ходе осуществить регулирование его скорости (частоты) вращения с помощью реостата, включенного в цепь обмотки возбуждения. Записать наибольшую и наименьшую скорости (частоты) вращения.
4. Загрузить двигатель параллельного возбуждения и осуществить регулирование его скорости (частоты) вращения с помощью регулировочного реостата, включенного в цепь якоря двигателя.
5. Остановить двигатель.
6. Изменить направление вращения двигателя.

7. Запустить двигатель, установить номинальную скорость (частоту) вращения при холостом ходе и снять механические характеристики, результаты измерений записать в таблицу и по ним построить характеристики.
8. Составить отчет.

### **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры двигателя постоянного тока, приборов и оборудования.
3. Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (см. рис. 1, а).
4. Табл. 1 с результатами испытаний двигателя параллельного возбуждения.
5. Механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
6. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое двигатель постоянного тока и как его пускают в ход?
2. Как можно изменить направление вращения электродвигателя постоянного тока?
3. Как регулируют скорость (частоту) вращения двигателя постоянного тока?

## **ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ**

### **Работа № 28. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДА**

Цель работы — ознакомиться с диодом — двухэлектродной электронной лампой, исследовать ее параметры и характеристики и проанализировать их.

**Пояснения.** В настоящее время широкое применение получили приборы, обладающие свойством пропускать электрический ток в одном направлении — двухэлектродные лампы, или диоды (рис. 1). Внутри стеклянного баллона, из которого откачан воздух, размещены анод 1, катод 2 и нить накала 3. Если по нити накала пропущен электрический ток, она подогревает катод и с его поверхности интенсивно вылетают электроны, т. е. возникает термоэлектронная эмиссия. Вокруг катода

создается электронное облако — пространство, заполненное электронами. Если между катодом и анодом имеется электрическое поле, электроны, находящиеся в электронном облаке, под воздействием этого поля дви-

жутся к положительному электроду — аноду, т. е. появляется ток, называемый анодным. Электрический ток, пропущенный по нити накала, называют током накала, напряжение между концами нити накала — напряжением накала, а напряжение между анодом и катодом — анодным. Анодное напряжение получают от источника постоянного тока (батареи, аккумулятора, выпрямителя), отрицательный полюс которого подключают к катоду, а положительный — к аноду.

Сила анодного тока зависит от положительного анодного напряжения, тока

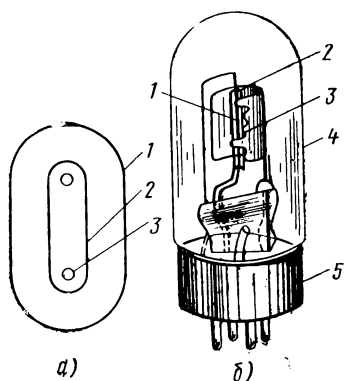


Рис. 1. Двухэлектродная электронная лампа (диод) косвенного накала:

*a* — схема расположения электродов, *б* — устройство; 1 — анод, 2 — катод, 3 — нить накала, 4 — колба, 5 — цоколь

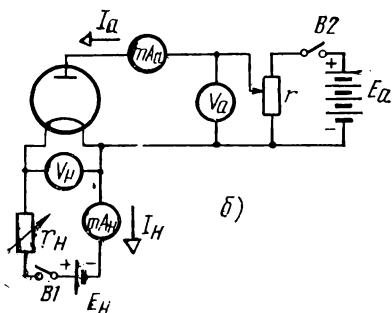
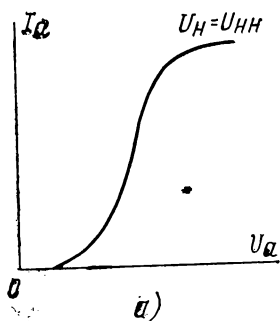


Рис. 2. Испытание диодов:

*a* — вольт-амперная характеристика, *б* — схема включения приборов; *B1* и *B2* — выключатели, *r* — потенциометр в анодной цепи, *r<sub>H</sub>* — резистор в цепи накала, *mA<sub>a</sub>* и *mA<sub>H</sub>* — миллиамперметры в цепи анода и в цепи накала, *V<sub>a</sub>* и *V<sub>H</sub>* — вольтметры анодного напряжения и напряжения накала, *E<sub>a</sub>* и *E<sub>H</sub>* — анодная и накальная батареи

накала и сопротивления цепи. Чем выше анодное напряжение при неизменном токе накала, тем больше анодный ток. Зависимость анодного тока от анодного напряжения называют анодной или вольт-амперной характеристикой диода (рис. 2, а). Другой важной характеристикой диода является зависимость анодного тока от напряжения накала (эмиссионная характеристика). Для снятия этих характеристик собирают схему, показанную на рис. 2, б. Анодное напряжение устанавливают потенциометром или резистором  $r$  в анодной цепи, а напряжение накала резистором  $r_n$  в цепи накала.

### Оборудование и аппаратура

Диод 6Д4Ж или 6Д6А косвенного накала	1 шт.
Вольтметры постоянного тока М340 на 7,5 и 150 В . . . . .	по 1 »
Миллиамперметры постоянного тока М340 на 0—300 и 0—30 мА . . . . .	» 1 »
Потенциометр на 0,1 А, 2000 Ом . . . . .	1 »
Резистор на 0,2 А, 1000 Ом . . . . .	1 »
Рубильник однополюсный на 20 А . . . . .	2 »
Панель ламповая . . . . .	1 »
Провода соединительные площадью сечения 1,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	16 »
Универсальный источник питания УИП-1 .	1 »

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (см. рис. 2, б), тщательно проверить полярность соединения источников питания и приборов.

2. Включить рубильник В1 и установить номинальное значение тока и напряжения накала ( $U_n=6,3$  В,  $I_n=0,15$  А), прогреть диод током накала в течение 1—2 мин.

3. Включить рубильник В2 и установить потенциометром минимальное анодное напряжение  $U_a$ .

4. Снять вольт-амперную анодную характеристику (см. рис. 2, а), измеряя анодный ток  $I_a$  при различных значениях анодного напряжения и неизменном токе накала. Показания миллиамперметра  $I_a$  в цепи анода и вольтметра  $U_a$  (анодное напряжение) записать в таблицу. Снять 8—10 точек.

Т а б л и ц а

Вольт-амперная характеристика диода

Зависимость	№ п/п	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$U_a$ , В	$I_a$ , А	Примечания
$I_a = f(U_a)$	1 2 3					
$I_a = f(U_H)$	1 2 3					

5. По данным таблицы начертить график зависимости анодного тока от анодного напряжения  $I_a = f(U_a)$  при номинальном напряжении накала  $U_H = U_{H.n}$ .

6. Исследовать зависимость анодного тока от напряжения накала при постоянном анодном напряжении, равным его номинальному значению. Результаты измерений записать в таблицу. При снятии характеристики следует производить отсчет анодного тока через 30—50 с после установления напряжения накала, так как у диодов с косвенным накалом катод обладает значительной тепловой инерцией.

7. По данным таблицы построить график  $I_a = f(U_H)$  при  $U_a = U_{a.n}$ .

8. Проанализировать анодные и эмиссионные характеристики.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема (см. рис. 2, б).
4. Таблица с измеренными величинами.
5. Графики зависимостей  $I_a = f(U_a)$  при номинальном напряжении накала и  $I_a = f(U_H)$  при номинальном анодном напряжении.

### Контрольные вопросы

1. Каковы конструкция и принцип действия диода?
2. Для чего к катоду и аноду подводят анодное напряжение?

3. От чего зависит сила анодного тока?
4. Как изменится анодный ток, если увеличить анодное напряжение?
5. Как и почему изменится анодный ток, если увеличить ток накала?
6. Где применяют двухэлектродные лампы (диоды)?

### Работа № 29. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА

Цель работы — ознакомиться с триодом — трехэлектродной электронной лампой, исследовать ее свойства, снять основные характеристики и проанализировать их.

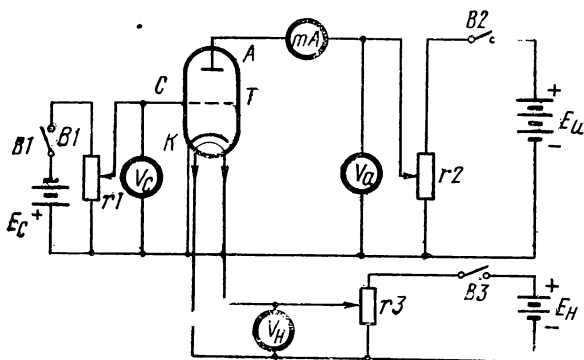


Рис. 1. Схема для исследования триода:

$T$  — триод,  $E_c$  — батарея напряжения сетки,  $B1$ ,  $B2$  и  $B3$  — выключатели,  $r1$ ,  $r2$  и  $r3$  — потенциометры в цепи сетки, в анодной и в цепи накала,  $V_c$ ,  $V_a$  и  $V_n$  — вольтметры сеточного, анодного напряжений и напряжения накала,  $E_a$  и  $E_n$  — батареи анодная и накала

**Пояснения.** Введение в вакуумный диод дополнительного электрода — сетки в виде спирали, охватывающей катод позволяет управлять электронным потоком в пространстве катод — анод. Такая лампа называется трехэлектродной, или триодом. Если между сеткой и катодом создать разность потенциалов, электроны, испускаемые катодом, вследствие термоэмиссии в промежутке катод — сетка либо ускоряются, либо замедляются.

Ускорение движения электронов от катода к аноду происходит, когда сетка по отношению к катоду имеет положительный потенциал, а замедление, — когда сет-



ка имеет отрицательный потенциал по отношению к катоду и на анод в результате падает большее или меньшее количество электронов. При определенном отрицательном потенциале на сетке замедляющее электрическое поле в промежутке сетка — катод способно полностью замедлить движение электронов и направить их обратно к катоду. В этом случае электроны не попадут на анод и анодный ток в лампе прекратится. Напряжение сетка — катод, при котором происходит прекращение анодного тока (запирание лампы), называют напряжением запирания.

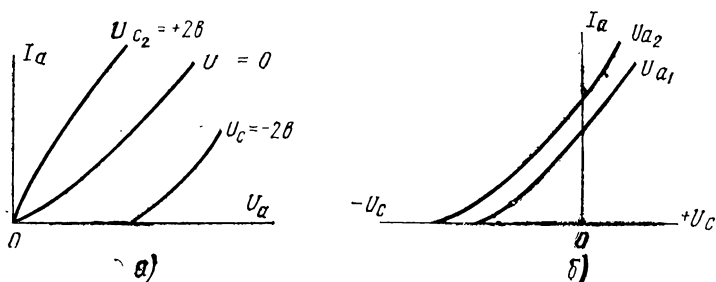


Рис. 2. Характеристики триода:

$a$  — анодные,  $б$  — анодно-сеточные;  $I_a$  — анодный ток,  $U_a$  и  $U_c$  — анодное и сеточное напряжения

Благодаря относительной близости сетки к катоду небольшие изменения ее потенциала воздействуют на анодный ток так же, как большие изменения анодного потенциала; в этом и заключается эффект усиления. Основные характеристики триода — анодная и анодно-сеточная. Анодную характеристику снимают при постоянном сеточном, а анодно-сеточную — при постоянном анодном напряжении. Для снятия характеристик нужно собрать схему, показанную на рис. 1. Характеристики приведены на рис. 2. Основными параметрами триода являются крутизна характеристики  $S$ , коэффициент усиления  $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$  и внутреннее сопротивление  $r_i$ .

## Оборудование и аппаратура

Трехэлектродная лампа 6СЗП или 6С2П . . .	1 шт.
Миллиамперметр постоянного тока на 20 мА	
для измерения анодного тока лампы . . . . .	1 »

Вольтметр постоянного тока на 150 В для измерения напряжения анода . . . . .	1 шт.
Вольтметр постоянного тока на 10 В . . . . .	2 »
Потенциометр на 250 Ом, 0,3 А . . . . .	3 »
Источники питания (накальная, сеточная и анодная батареи):	
5НКН-45 . . . . .	1 »
2НКН-45 . . . . .	1 »
64АКН-2,25 . . . . .	2 »
Выключатели для включения цепей накала, сетки и анода . . . . .	3 »
Провода соединительные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	30 »

## Порядок выполнения работы

Анодные характеристики снимают при трех фиксированных значениях напряжения на сетке:  $U_c = -2$  В,  $U_c = 0$  и  $U_c = +2$  В в следующем порядке:

1. Собрать схему (см. рис. 1) и тщательно проверить правильность соединений, в особенности анодных цепей.

2. Включить выключателем ВЗ цепь накала лампы и установить потенциометром  $r3$  номинальное напряжение. Прогреть лампу в течение 1 мин.

3. Включить выключателем В1 цепь сетки лампы и установить потенциометром  $r1$  фиксированное значение напряжения сетки.

4. Включить выключателем В2 цепь анода лампы. Потенциометром  $r2$  устанавливать различные значения анодного напряжения (6—8 точек) от 0 до номинального значения  $U_{a.n}$  и при каждом его значении снимать показания приборов и записывать их в таблицу.

5. Провести такие же измерения при другом фиксированном значении напряжения сетки.

6. По данным таблицы построить графики  $I_a = f(U_a)$  при разных сеточных напряжениях (см. рис. 2, а), по которым определить внутреннее сопротивление  $r_i$  при анодном напряжении, равном 70—80 В, и при сеточном, равном нулю.

Анодно-сеточные характеристики снимают при двух фиксированных значениях напряжения на аноде: 80 и 150 В в следующем порядке:

1. Повторить операции п. 1 и 2, сделанные при снятии анодных характеристик.

2. Включить выключателем В2 анодную цепь лампы и установить потенциометром  $r2$  фиксированное значение напряжения анода, равное половине номинального.

Таблица

**Анодные и анодно-сеточные характеристики  
трехэлектродной лампы**

Характеристика	№ п/п	$U_H$ , В	$U_c$ , В	$I_a$ , А	$U_a$ , В
Анодная	1 2 3				
Анодно-сеточная	1 2 3				

3. Устанавливать потенциометром  $r1$  различные значения напряжения сетки (8—10 точек) от напряжения запираания лампы до нуля и при каждом его значении снимать показания приборов и записывать их в таблицу.

4. Провести такие же измерения при другом фиксированном значении анодного напряжения, равном номинальному.

5. По данным таблицы построить график  $I_a = f(U_c)$  при  $U_{a1} = U_{a.n}/2 = \text{const}$ ;  $U_{a2} = U_{a.n} = \text{const}$ ; (см. рис. 2, б), по которому вычислить крутизну характеристики  $S$  для  $U_c = -1$  В и  $U_a = 80$  В.

6. Составить отчет.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Электрическая схема измерений.
4. Таблицы с измеренными величинами.
5. Графики зависимостей  $I_a = f(U_a)$  при  $U_c = \text{const}$  и  $I_a = f(U_c)$  при  $U_a = \text{const}$ .

### Контрольные вопросы

1. По какому принципу работает трехэлектродная лампа? Для чего необходим дополнительный электрод — сетка?
2. Движение каких частиц создает электрический ток в трехэлектродной вакуумной лампе?

3. Как называется напряжение на сетке, при котором прекращается анодный ток лампы?

4. Каковы основные характеристики триода?

5. Что такое крутизна характеристики, коэффициент усиления и внутреннее сопротивление триода и как их определяют?

### **Работа № 30. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕТРОДА**

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия тетрода, снять его основные характеристики и определить параметры: внутреннее сопротивление  $r_i$ , коэффициент усиления  $\mu$  и крутизну  $S$ .

**Пояснения.** Тетрод (четырёхэлектродная двухсеточная электронная лампа) отличается от триода тем, что между управляющей сеткой и анодом установлена дополнительная экранирующая сетка, к которой относительно катода прикладывается положительный потенциал, за счет чего движение электронов от катода к аноду определяется в основном потенциалом экранирующей сетки и мало зависит от потенциала анода. Вследствие этого характеристики и параметры тетрода существенно отличаются от характеристик и параметров триода. Основными характеристиками тетрода, как и триода, являются анодная и анодно-сеточная.

Следует отметить один существенный недостаток тетрода. На его экранирующую сетку подается положительное напряжение значительной величины. В процессе работы анодный потенциал может оказаться меньше потенциала экранирующей сетки. При этом электроны, возникающие за счет вторичной эмиссии, полетят, от анода к сетке, что приведет к искажению характеристик лампы. Это явление называется динаatronным эффектом. Для уменьшения этих искажений в лампе устанавливают лучеобразующие электроды, концентрирующие электроны в плотные лучи. Такая лампа называется лучевым тетродом.

Исследуют тетрод и снимают его основные характеристики по схеме, показанной на рис. 1. На анод и экранирующую сетку тетрода подают высокий потенциал от блока питания БП1. Цепи накала и управляющей сетки питаются от низковольтных батарей  $E_c$  и  $E_n$ . Анодная и анодно-сеточная характеристики показаны на

рис. 2. Особенно заметно резкое отличие тетрода от триода по анодным характеристикам. Характеристики тетрода более пологие, почти параллельны оси абсцисс, что говорит о большем внутреннем сопротивлении и коэффициенте усиления лампы. Преимущества тетрода позволяют использовать их в усилителях низких и сред-

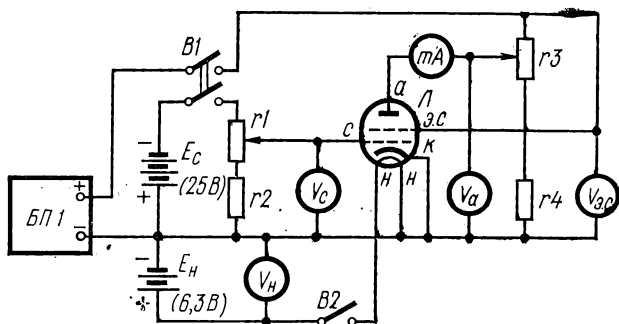


Рис. 1. Схема для исследования тетрода:

Л — тетрод,  $E_c$  и  $E_n$  — батареи питания управляющей сетки и накала, БП1 — блок питания анода и экранирующей сетки, B1 и B2 — выключатели, r1 и r3 — потенциометры, r2 и r4 — резисторы,  $V_c$ ,  $V_n$ ,  $V_a$  и  $V_{э.с}$  — вольтметры напряжения управляющей сетки, накала, анодного напряжения и экранирующей сетки, mA — миллиамперметр анодного тока

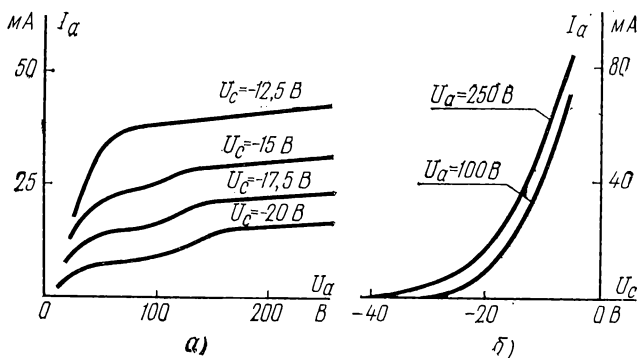


Рис. 2. Основные характеристики тетрода при напряжении экранирующей сетки 250 В:

а — анодные, б — анодно-сеточные;  $I_a$  — анодный ток,  $U_a$  и  $U_c$  — напряжения анодное и управляющей сетки

них частот радиодиапазона. Например, в усилителях мощности ламповых радиоприемников применяют лучевой тетрод 6П1П.

## Оборудование и аппаратура

Тетрод 6П1П или 6П6С . . . . .	1 шт.
Миллиамперметр постоянного тока на 50 мА для измерения анодного тока . . . . .	1 »
Вольтметр постоянного тока на 300 В для измерения напряжений анода и экранирующей сетки . . . . .	2 »
Вольтметры постоянного тока на 30 и 10 В для измерения напряжения управляющей сетки и накала . . . . .	по 1 »
Резистор на 300 Ом, 1 А . . . . .	3 »
Резистор на 200 Ом, 1 А . . . . .	1 »
Источники питания (накальная и сеточная батареи) 5НКН-45 . . . . .	5 »
Блок питания постоянного тока на 250 В, 1 А . . . . .	1 »
Выключатели на 250 В, 1 А . . . . .	2 »
Провода соединительные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	40 »

## Порядок выполнения работы

Анодные характеристики снимают при трех фиксированных напряжениях управляющей сетки:  $U_c = -12,5$  В;  $U_c = -15$  В и  $U_c = -20$  В в следующем порядке:

1. Собрать схему (см. рис. 1) и тщательно проверить правильность соединений, особенно цепей анода и экранирующей сетки.

2. Включить выключателем  $B2$  цепь накала и прогреть лампу в течение 1 мин.

3. Включить выключателем  $B1$  цепи анода и сеток, установить на блоке питания  $БП1$  напряжение 250 В (контролируется вольтметром  $V_{a.c}$ ), резистором  $r1$  установить напряжение управляющей сетки  $U_c = -12,5$  В, а резистором  $r3$  устанавливать различные значения анодного напряжения (4—6 точек), начиная от 250 В.

4. При каждом значении анодного напряжения записать показания приборов в таблицу.

5. Провести такие же измерения при двух других фиксированных напряжениях на управляющей сетке.

6. По данным таблицы построить графики  $I_a=f(U_a)$  при трех фиксированных напряжениях управляющей сетки, по которым определить внутреннее сопротивление  $r_i$  лампы при анодном напряжении 150—200 В и напряжении управляющей сетки —15 В.

Анодно-сеточные характеристики снимают при двух фиксированных напряжениях анода:  $U_a=-250$  В и  $U_a=100$  В в следующем порядке:

1. Включить выключателем В2 цепь накала и прогреть лампу в течение 1 мин.

2. Включить выключателем В1 цепи анода и сеток, установить на блоке питания БП1 напряжение 250 В (контролируется вольтметром  $V_{a.c}$ ), резистором  $r3$  установить напряжение анода  $U_a=250$  В, а резистором  $r1$  устанавливать различные значения напряжения управляющей сетки (4—6 точек), начиная от напряжения —25 В.

3. При каждом значении напряжения управляющей сетки записать показания приборов в таблицу.

4. Провести такие же измерения при другом фиксированном напряжении анода ( $U_a=100$  В).

5. По данным таблицы построить графики  $I_a=f(U_c)$  при двух фиксированных напряжениях анода, по которым определить крутизну характеристики  $S$  при напряжении управляющей сетки —15 В и коэффициент усиления  $\mu$  при анодном токе 30 мА.

6. Составить отчет.

Т а б л и ц а

Анодные и анодно-сеточные характеристики тетрода

Характеристика	№ п/п	$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{э.с.}}$ , В	$U_{\text{с}}$ , В	$U_{\text{а}}$ , В	$I_{\text{а}}$ , мА
Анодная						
Анодно-сеточная						

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Схема испытания тетрода.
4. Таблица с измеренными величинами.
5. Графики зависимостей  $I_a = f(U_a)$  и  $I_a = f(U_c)$  и расчет параметров тетрода:  $r_i$ ,  $S$  и  $\mu$ .

## Контрольные вопросы

1. Что дает введение в лампу дополнительного электрода — экранирующей сетки и где его располагают?
2. Какое напряжение нужно подавать на экранирующую сетку?
3. Каковы основные характеристики тетрода?
4. Как определить внутреннее сопротивление, крутизну характеристики и коэффициент усиления тетрода и чему они равны у исследованной лампы?
5. Каков основной недостаток тетрода?
6. У какой лампы, тетрода или триода больше коэффициент усиления и внутреннее сопротивление и почему?

## Работа № 31. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕНТОДА

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия пентода, исследовать его основные характеристики и определить параметры.

**Пояснения.** Для устранения динаatronного эффекта в электронную лампу между экранирующей сеткой и анодом вводят дополнительную защитную сетку. Называется такая трехсеточная лампа пентодом. На защитную сетку пентода подают низкий потенциал (обычно потенциал катода). Введение защитной сетки почти не изменяет анодной и анодно-сеточной характеристик лампы при потенциалах анода больших, чем потенциал экранирующей сетки, и они в этой области у пентода и тетрода почти совпадают.

Исследование пентода заключается в снятии его анодной и анодно-сеточной характеристик по схеме, показанной на рис. 1. На рис. 2 показаны анодная и анодно-сеточная характеристики пентода 6П14П. По анодным характеристикам видно, что искажения, вызываемые динаatronным эффектом, отсутствуют. Это положительное



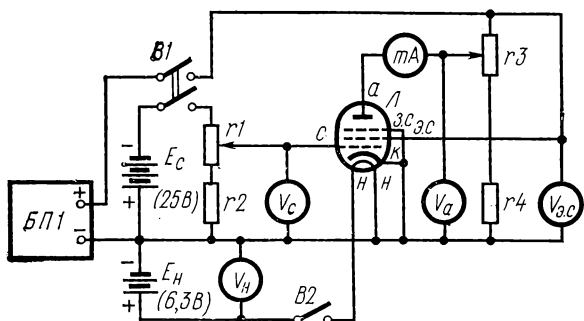


Рис. 1. Схема для исследования пентода:

$\mathcal{L}$  — пентод,  $E_c$  и  $E_n$  — батареи питания управляющей сетки и накала, БП1 — блок питания анода и экранирующей сетки, B1 и B2 — выключатели,  $r1$  и  $r3$  — потенциометры,  $r2$  и  $r4$  — резисторы,  $V_c$ ,  $V_n$ ,  $V_a$  и  $V_{э.с}$  — вольтметры напряжения управляющей сетки, накала, анодного напряжения и экранирующей сетки,  $mA$  — миллиамперметр анодного тока

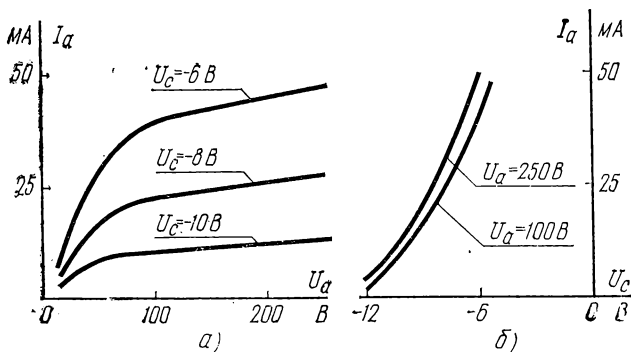


Рис. 2. Основные характеристики пентода 6П14П при напряжениях экранирующей сетки 250 В и на защитной сетке 0:

$a$  — анодная,  $b$  — анодно-сеточная,  $I_a$  — анодный ток,  $U_a$  и  $U_c$  — напряжения анодное и управляющей сетки

свойство объясняет более широкое применение пентодов по сравнению с тетрами. Используют пентоды в радиоаппаратуре, устройствах автоматики, телемеханики и др.

## Оборудование и аппаратура

Пентод 6П14П . . . . .	1 шт.
Миллиамперметр постоянного тока на 50 мА для измерения анодного тока . . . . .	1 »

Вольтметр постоянного тока на 300 В для измерения напряжения анода и экранирующей сетки . . . . .	2 »
Вольтметры постоянного тока на 30 и 10 В для измерения напряжения управляющей сетки и накала . . . . .	по 1 »
Резистор на 300 Ом, 1 А . . . . .	2 »
Потенциометры на 82 и 200 Ом, 1 А . . . . .	по 1 »
Источники питания (накальная и сеточная батареи) 5НКН-45 . . . . .	5 »
Блок питания постоянного тока на 250 В, 1 А . . . . .	1 »
Выключатель на 250 В, 1 А . . . . .	2 »
Провода соединительные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	40 »

### Порядок выполнения работы

Анодные характеристики снимают при трех фиксированных напряжениях управляющей сетки:  $U_c = -6$ ;  $-8$  и  $-10$  В в следующем порядке:

1. Собрать схему (см. рис. 1) и тщательно проверить правильность соединений, особенно цепей анода и экранирующей сетки.

2. Включить выключателем  $B2$  цепь накала и прогреть пентод в течение 1 мин.

3. Включить выключателем  $B1$  цепи анода и сеток, установить на блоке питания  $БП1$  напряжение 250 В (контролируется вольтметром  $V_{a.c}$ ), потенциометром  $r1$  установить по вольтметру напряжение управляющей сетки  $U_c = -6$  В, а потенциометром  $r3$  устанавливать по вольтметру  $V_a$  различные значения анодного напряжения (4—6 точек), начиная от напряжения 250 В и ниже.

4. При каждом значении анодного напряжения записывать показания приборов в таблицу.

5. Провести такие же измерения при двух других фиксированных напряжениях на управляющей сетке.

6. По данным таблицы построить графики  $I_a = f(U_a)$  при трех фиксированных напряжениях управляющей сетки, по которым определить внутреннее сопротивление  $r_i$  пентода при анодном напряжении 150—200 В и напряжении управляющей сетки  $-8$  В.

Анодно-сеточные характеристики снимают при двух фиксированных напряжениях анода:  $U_a = 250$  В и  $U_a = 100$  В в следующем порядке:

1. Включить выключателем  $B2$  цепь накала и прогреть пентод в течение 1 мин.

Таблица

## Анодные и анодно-сеточные характеристики пентода

Характеристика	№ п.п	$U_H$ , В	$U_{э.с.}$ , В	$U_c$ , В	$U_a$ , В	$I_a$ , мА
Анодная	1					
	2					
	3					
Анодно-сеточная	1					
	2					
	3					

2. Включить выключателем  $B1$  цепи анода и сеток, установить на блоке питания  $БП1$  напряжение 250 В (контролируется вольтметром  $V_{a.c}$ ), потенциометром  $r3$  установить анодное напряжение  $U_a=250$  В, а потенциометром  $r1$  устанавливать различные значения напряжения управляющей сетки (4—6 точек), начиная от напряжения —6 В и ниже.

3. При каждом значении напряжения управляющей сетки записывать показания приборов в таблицу.

4. Провести такие же измерения при другом фиксированном напряжении анода ( $U_a=100$  В).

5. По данным таблицы построить графики  $I_a=f(U_c)$  при двух фиксированных напряжениях анода, по которым определить при напряжении управляющей сетки 8 В крутизну характеристики и при анодном токе 30 мА коэффициент усиления пентода.

6. Составить отчет.

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и аппаратуры.
3. Схема исследования пентода.
4. Таблица с измеренными величинами.
5. Графики зависимостей  $I_a=f(U_a)$  и  $I_a=f(U_c)$  и расчет параметров пентода:  $r_i$ ,  $S_u$ ,  $\mu$ .

## Контрольные вопросы

1. Для чего служит защитная сетка в пентоде и какое напряжение нужно на нее подавать?
2. Каковы основные характеристики пентода?
3. Каковы основные параметры пентода и какие параметры имеет исследованная вами электронная лампа?

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

### Работа № 32. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы — ознакомиться с полупроводниковым диодом, исследовать его свойства, снять вольт-амперную характеристику и проанализировать ее.

**Пояснения.** Полупроводники по своему удельному электрическому сопротивлению занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Носителями тока в них являются, кроме свободных электронов, так называемые дырки. Это свободные места, возникающие в кристаллической решетке атомов при отрыве электронов. На любое из таких свободных мест может перейти электрон из соседнего атома, оставив после себя новую дырку. Таким образом, дырки могут передаваться от атома к атому, что равноценно движению положительного заряда в направлении перемещения дырки.

В химически чистом полупроводнике число свободных электронов и дырок одинаково мало, поэтому такой полупроводник плохо проводит электрический ток. Чтобы увеличить проводимость полупроводника, в него добавляют незначительное (порядка  $1 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-8}$ ), но точно определенное количество примеси, которая придает проводимости полупроводника определенный характер — электронный или дырочный, т. е. в полупроводнике в качестве носителей тока начинают преобладать электроны или дырки. Так, если в кристалл чистого четырехвалентного германия ввести примесь пятивалентного элемента, например сурьмы, то в нем появится избыток свободных электронов, а если в кристалл чистого германия ввести примесь трехвалентного элемента, например индия, он будет иметь избыток дырок. Примесный элемент, создающий избыток электронов в полупроводнике, называется донором, а полупроводник с электронной проводи-

мостью — полупроводником  $n$ -типа. Примесный элемент, создающий в полупроводнике избыток дырок, называют акцептором (проводимость  $p$ -типа).

Если спаять два кристалла с разными проводимостями, образуется полупроводниковый  $p-n$ -переход, который обладает очень ценным свойством — вентильным действием, т. е. хорошо проводит электрический ток только в одном направлении. Отсюда и его название: полупроводниковый диод, или полупроводниковый вентиль.

Если приложить к  $p-n$ -переходу разность потенциалов полярностью, указанной на рис. 1, электроны, находящиеся в зоне  $n$ , под действием электрического поля устремятся через переход в зону  $p$ , а дырки, находящиеся в зоне  $p$ , под действием того же электрического поля, устремятся через переход в зону  $n$ . В области перехода дырки и электроны нейтрализуются или, как обычно говорят, рекомбинируют. Такое встречное движение носителей заряда разного знака является электрическим током через  $p-n$ -переход. При обратной полярности дырки и электроны движутся от перехода и через него нет движения носителей заряда, поэтому и электрический ток через переход почти не течет. Малый ток в непроводящем направлении диода создается неосновными носителями тока — дырками, имеющимися в малом количестве в электронном полупроводнике, и свободными электронами, имеющимися в дырочном полупроводнике. Полупроводниковый диод хорошо пропускает электрический ток только в одном — прямом направлении. Когда источник напряжения включен противоположной полярностью, в обратном направлении течет значительно меньший ток. Соответственно этому введены понятия: прямой ток и прямое напряжение (когда диод открыт и пропускает ток) и обратный ток и обратное напряжение (когда диод закрыт и практически не пропускает тока).

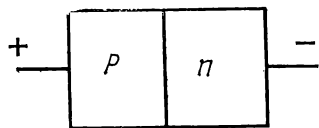


Рис. 1. Схема полупроводникового диода

Основной характеристикой полупроводникового диода является вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость тока от напряжения, приложенного к диоду (рис. 2, а). Вольт-амперную характеристику снимают по схеме, показанной на рис. 2, б. Основными параметрами полу-

проводникового диода являются прямое сопротивление

$$R_F = \frac{U_F}{I_F}$$

и максимально допустимый прямой ток.

## Оборудование и аппаратура

Ампервольтметр АВО-5М1 . . . . .	1 шт.
Вольтметр щитовой магнитоэлектрический на 3 В . . . . .	1 »
Милливольтметр щитовой магнитоэлектрический на 150 мВ . . . . .	1 »
Полупроводниковый диод (кремниевый МД-226) . . . . .	1 »
Потенциометр на 10 Ом . . . . .	1 »
Переключатель полярности на три положения на 10 А . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 0,8 м . . . . .	10 »
Универсальный источник питания УИП-1 . . . . .	1 »

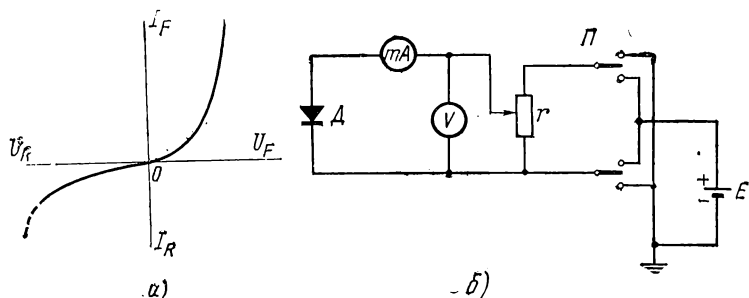


Рис. 2. Исследование полупроводникового диода:

*a* — вольт-амперная характеристика, *б* — схема включения приборов; *D* — полупроводниковый диод, *mA* — миллиамперметр, *V* — вольтметр, *П* — переключатель, *E* — аккумуляторная батарея, *U<sub>F</sub>* — прямое напряжение, *I<sub>F</sub>* — прямой ток, *U<sub>R</sub>* — обратное напряжение, *I<sub>R</sub>* — обратный ток, *r* — потенциометр

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (см. рис. 2, б).
2. Установить переключатель в нижнее положение (предварительно установить движок потенциометра в крайнее нижнее положение).
3. Установить потенциометром различные значения напряжения (6—8 точек) от нуля до напряжения, при ко-

тором сила тока находится в пределах 250—300 мА и записать показания приборов в таблицу.

4. Установить переключатель в верхнее положение (предварительно установить движок потенциометра в крайнее нижнее положение).

5. Установить потенциометром 3—4 точки от нуля до 6 В.

6. По данным таблицы построить графики зависимости  $I_F = f(U_F)$ .

7. По данным таблицы рассчитать сопротивления:

$$R_F = \frac{U_F}{I_F} \text{ при } 250 \text{ мА} \leq I_F \leq 300 \text{ мА}$$

и

$$R_R = \frac{U_R}{I_R} \text{ при } U_R = 6 \text{ В.}$$

Т а б л и ц а

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода

№ опыта	$I_F$ , мА	$U_F$ , В	$I_R$ , мА	$U_R$ , В	$R_F$ , Ом	$R_R$ , Ом

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Схема измерений.
4. Таблица с измеренными и вычисленными величинами.
5. Графики зависимости  $I_F = f(U_F)$  и  $I_R = f(U_R)$ .

### Контрольные вопросы

1. По какому принципу работает полупроводниковый диод?
2. Почему к полупроводниковому диоду необходимо приложить разность потенциалов (минусом к зоне  $n$  и плюсом к зоне  $p$ ), чтобы появился электрический ток?
3. Что называют прямым и обратным напряжением диода?
4. Как изменяется ток через диод при изменении прямого напряжения?
5. Каково основное отличие полупроводникового диода от двух-электродной лампы?
6. Как изменяется сопротивление полупроводникового диода при изменении полярности приложенного напряжения?

## Работа № 33. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Цель работы — ознакомиться с транзистором (полупроводниковым триодом), исследовать его основные свойства и снять основные характеристики.

**Пояснения.** Транзистор (полупроводниковый триод) имеет два  $p-n$ -перехода, направленных навстречу друг другу. В зависимости от проводящего направления каждого перехода имеются два типа триодов:  $p-n-p$  или  $n-p-n$  (рис. 1). Зоны транзистора обозначают: Э — эмиттерная, Б — базовая, К — коллекторная. Соответст-

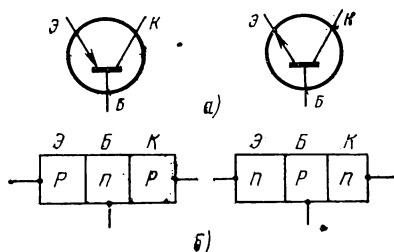


Рис. 1. Типы транзисторов:

а — условные графические обозначения на схемах, б — структурные схемы, Э — эмиттерная зона, Б — базовая зона, К — коллекторная зона

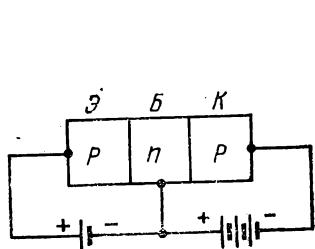


Рис. 2. Схема соединения источников питания и транзистора  $p-n-p$ -типа с общей базой

венно имеются два перехода: эмиттерный и коллекторный. Наибольшее распространение получили триоды  $p-n-p$ -типа.

Если к эмиттерному переходу приложить напряжение в проводящем (прямом) направлении, как показано на рис. 2, он окажется открытым. Носители заряда (в данном случае дырки), находящиеся в эмиттерной зоне, под воздействием электрического поля движутся через эмиттерный переход в базовую зону. Если напряжение к коллекторному переходу приложено в непроводящем (обратном) направлении, электроны, находящиеся в базовой зоне, не могут пройти коллекторный переход, так как сильное электрическое поле в области перехода заставляет их двигаться в обратную сторону. По той же причине дырки, находящиеся в коллекторной зоне, не могут попасть в базовую зону. Однако дырки, прошедшие в базо-



вую зону из эмиттерной, под воздействием того же электрического поля интенсивно движутся в коллекторную зону.

Ширину базовой зоны делают как можно меньше, чтобы дырки проходили из эмиттерной зоны, не успевая рекомбинировать (нейтрализоваться) с электронами в базовой зоне.

Лишь небольшая часть дырок рекомбинирует в базовой зоне с местными электронами. Основное количество дырок проходит через базовую в коллекторную зону. Дырки, движущиеся через эмиттерный и коллекторный проходы, представляют собой соответственно эмиттерный и коллекторный токи. Отношение коллекторного тока к эмиттерному называют коэффициентом усиления триода по току:  $\alpha = \Delta I_K / \Delta I_E$ .

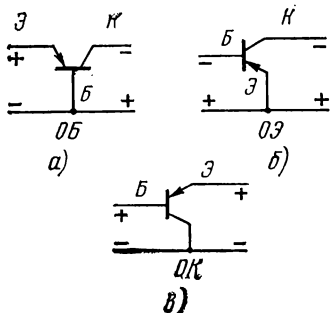


Рис. 3. Схема соединений транзисторов:

а — с общей базой, б — с общим эмиттером, в — с общим коллектором

Существуют три схемы включения транзистора: с общей базой ОБ (рис. 3, а), с общим эмиттером ОЭ (рис. 3, б) и с общим коллектором ОК (рис. 3, в). В работе предусмотрено исследование первой схемы. Основными характеристиками транзистора, включенного по схеме с

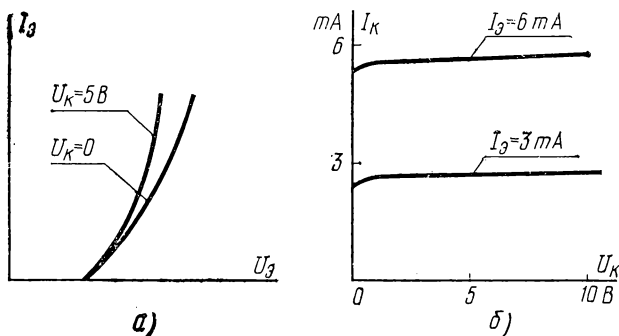


Рис. 4. Статические характеристики транзистора с общей базой:

а — входная, б — выходная

общей базой, являются входная, выражающая зависимость тока эмиттера от напряжения при постоянном напряжении коллектора (рис. 4, а), и выходная, показывающая зависимость тока коллектора от напряжения при постоянном токе эмиттера (рис. 4, б). Снимают эти характеристики по схеме, показанной на рис. 5.

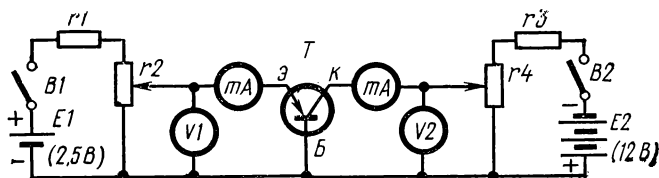


Рис. 5. Схема для исследования транзистора:  
 $T$  — транзистор,  $B1$  и  $B2$  — выключатели,  $E1$  и  $E2$  — аккумуляторные батареи,  $r1$  и  $r3$  — резисторы,  $r2$  и  $r4$  — потенциометры,  $V1$  и  $V2$  — вольтметры,  $mA$  — миллиамперметры

## Оборудование и аппаратура

Транзистор плоскостной МП13 или П41 . . . . .	1 шт.
Вольтметры постоянного тока на 30 и 1 В . . . . .	по 1 »
Миллиамперметр постоянного тока на 10 мА . . . . .	2 »
Резистор МТ-0,5 на 240 Ом $\pm 10\%$ . . . . .	2 »
Потенциометр на 1 кОм, 30 мА . . . . .	2 »
Выключатель на 5 А . . . . .	2 »
Аккумулятор 2НКН-45 или сухая батарея на 2,5 В . . . . .	1 »
Аккумулятор 5НКН-45 . . . . .	2 »
Провода соединительные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	20 »

## Порядок выполнения работы

Входную характеристику снимают при двух фиксированных значениях напряжения коллектора:  $U_{к1}=0$ ;  $U_{к2}=10$  В в следующем порядке:

1. Собрать схему (см. рис. 5), проверив полярность включенных элементов.

2. Включить выключатель  $B2$  и установить потенциометром первое фиксированное напряжение на коллектор (в процессе работы поддерживать его строго постоянным).

3. Включить выключателем  $B1$  эмиттерную цепь, потенциометром  $r2$  установить различные значения напряжения на эмиттере (5—6 точек) от 0 до +0,2 В и при

каждом значении напряжения на эмиттере записать показания всех приборов в таблицу.

4. Потенциометром  $r4$  установить другое фиксированное напряжение на коллекторе и, поддерживая его строго постоянным, повторить операции, указанные в п. 3.

5. По данным таблицы начертить кривые зависимости  $I_{\alpha} = f(U_{\alpha})$  при  $U_{K1} = 0$ ;  $U_{K2} = 10$  В.

Выходную характеристику снимают при двух фиксированных значениях тока эмиттера 3 и 6 мА.

1. Собрать схему (см. рис. 5).

2. Включить выключателем  $B2$  коллекторную, а выключателем  $B1$  эмиттерную цепи транзистора и установить потенциометром  $r2$  первое фиксированное значение тока эмиттера (в процессе работы поддерживать его строго постоянным).

3. Устанавливая потенциометром  $r4$  различные значения напряжения на коллекторе (5—6 точек) и записывать в таблицу показания приборов при всех значениях напряжения.

4. Установить второе фиксированное значение тока эмиттера и, поддерживая его строго постоянным, выполнить операцию, указанную в п. 3.

5. По данным таблицы построить график зависимости  $I_K = f(U_K)$  при  $I_{\alpha 1} = 3$  мА и  $I_{\alpha 2} = 6$  мА.

6. Составить отчет.

Т а б л и ц а

Характеристики транзистора

Характеристика	№ п/п	$U_{\alpha}$ , В	$I_{\alpha}$ , А	$U_K$ , В	$I_K$ , А
Входная	1				
	2				
	3				
Выходная	1				
	2				
	3				

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.

2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.

3. Электрическая схема.
4. Таблица с измеренными величинами.
5. Графики зависимостей:  $I_a = f(U_a)$  при  $U_k = \text{const}$ ;  $I_k = f(U_k)$  при  $I_a = \text{const}$ .

### Контрольные вопросы

1. Какие типы транзисторов вы знаете?
2. Что означает коэффициент усиления  $\alpha$  транзистора по току?
3. Каково основное отличие транзистора от трехэлектродной лампы?
4. Где применяют транзисторы?

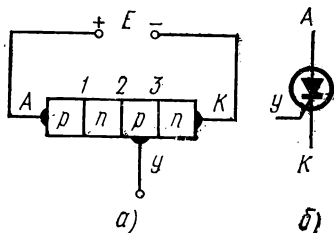
### Работа № 34. ИССЛЕДОВАНИЕ И СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРА.

Цель работы — ознакомиться с работой тиристора, его основными параметрами и характеристиками.

Пояснения. Тиристором (рис. 1, а) называют полу-

Рис. 1. Диодный тиристор (управляемый диод):

а — структурная схема, б — условное графическое обозначение тиристора с управляющим выводом от  $p$ -области; А — анод, К — катод, У — управляющий электрод (цифрами обозначены номера переходов)



проводниковый прибор, который имеет три  $p$ — $n$ -перехода, направленных навстречу друг другу. Если к тиристор-у приложить напряжение  $E$ , как показано на рис. 1, а, к переходам 1 и 3 будет приложено прямое напряжение, а к переходу 2 обратное. Пока напряжение  $E$  невелико, токи через переходы 1 и 3 малы и переход 2 закрыт. Но если напряжение  $E$  повысить или к переходу 3 (управляющий электрод — катод) приложить дополнительное положительное напряжение от внешнего источника, переход 3 откроется. Электроны из  $n$ -зоны пройдут через переход 3 и переход 2 и будут накапливаться в  $n$ -зоне между переходами 1 и 2, частично проходя через переход 1 к аноду. Точно так же дырки из  $p$ -зоны пройдут переход 1 и переход 2 и будут накапливаться в  $p$ -зоне между пе-

переходами 2 и 3, частично проходя через переход 3 к катоду. Таким образом, переходы 1 и 2 откроются еще сильнее до полного насыщения и наступит лавинный процесс, после которого тиристор становится неуправляемым.

Основными характеристиками тиристора являются вольт-амперные (рис. 2). При отсутствии управляющего

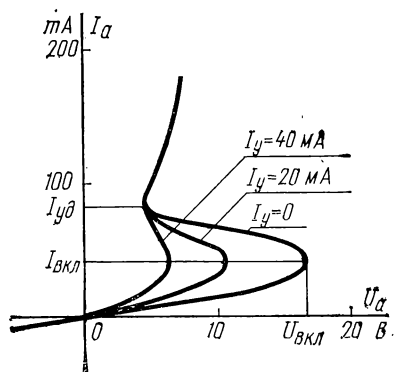


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики тиристора

тока ( $I_y=0$ ) для открытия тиристора на него нужно подать напряжение включения  $U_{вкл}$ . При наличии управляющего тока тиристор открывается при меньшем напряжении анода. Ток анода, при котором тиристор открывается, называется током включения  $I_{вкл}$ . Для закрытия тиристора необходимо, чтобы ток анода стал меньше тока удержания  $I_{уд}$ .

Исследуют тиристор и снимают вольт-амперные характеристики по схеме, показанной на рис. 3.

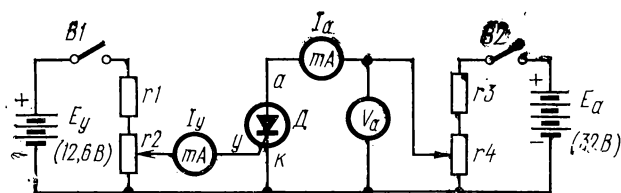


Рис. 3. Схема для исследования тиристора:

$D$  — тиристор,  $mA$  — миллиамперметры,  $V_a$  — вольтметр,  $E_y$  и  $E_a$  — батареи питания управляющего электрода и анода,  $r1$  и  $r3$  — резисторы,  $r2$  и  $r4$  — потенциометры,  $B1$  и  $B2$  — выключатели

Тиристоры широко применяют в различных устройствах автоматики (например, в схемах регулирования электропривода, стабилизаторах напряжения переменного тока и др.).

## Оборудование и аппаратура

Тиристор КУ201 А . . . . .	1 шт. .
Вольтметр на 30 В . . . . .	1 »
Амперметр на 1 А . . . . .	1 »
Миллиамперметр на 20 мА . . . . .	1 »
Батарея питания 5НКН-45 . . . . .	7 »
Резистор ( $r1$ ) 100 Ом, 10 Вт . . . . .	1 »
Потенциометр ( $r2$ ) 1000 Ом, 0,5 А . . . . .	1 »
Резистор ( $r3$ ) 20 Ом, 2 А . . . . .	1 »
Потенциометр ( $r4$ ) 200 Ом, 2 А . . . . .	1 »
Выключатели однополюсные 100 В, 10 А . . . .	2 »
Провода соединительные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	20 »

## Порядок выполнения работы

Для исследования тиристора снимают вольт-амперные характеристики при трех фиксированных значениях управляющего тока  $I_{y1}=0$ ,  $I_{y2}=40$  мА и  $I_{y3}=100$  мА в следующем порядке:

1. Собрать схему (см. рис. 3) и проверить правильность подключения элементов и батарей питания.

2. Включить выключатель  $B1$  и установить потенциометром  $r2$  первое фиксированное значение управляющего тока  $I_{y1}=0$ .

3. Замкнуть выключателем  $B2$  цепь анода и потенциометром установить различные значения анодного тока (10—12 точек) от 0 до 1 А.

4. При каждом значении анодного тока записать показания приборов в таблицу.

Т а б л и ц а

Вольт-амперные характеристики тиристора

№ п/п	$I_y$ , мА	$I_a$ , А	$U_a$ , В	Пр и м е ч а н и я
1				
2				
3				

5. Потенциометром  $r2$  установить и строго поддерживать другое значение управляющего тока и повторить операцию по п. п. 3 и 4.

6. По данным таблицы построить график зависимостей  $I_a=f(U_a)$  при  $I_{y1}=0$ ;  $I_{y2}=40$  мА и  $I_{y3}=100$  мА и по

нему определить напряжение включения тиристора, ток включения и ток удержания.

### **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Схема измерений.
4. Таблица с измеренными величинами.
5. Графики зависимостей  $I_a = f(U_a)$ .
6. Найденные по графику величины напряжения и тока включения и тока удержания.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем отличается тиристор от транзистора?
2. Что нужно сделать чтобы открыть тиристор?
3. Какой процесс происходит в тиристоре при открывании?
4. Каковы основные характеристики и параметры тиристора?
5. Как вольт-амперная характеристика зависит от управляющего тока?

### **Работа № 35. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО СТАБИЛИТРОНА**

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия полупроводникового стабилитрона, исследовать его свойства; снять вольт-амперную характеристику и определить динамическое сопротивление стабилитрона.

**Пояснения.** Полупроводниковым стабилитроном называют полупроводниковый диод, работающий в области пробоя на обратной ветви вольт-амперной характеристики. На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д810. При обратных напряжениях до 10 В ток незначителен и определяется наличием небольшого количества свободных неосновных носителей в  $n$  и  $p$ -зонах диода. При увеличении обратного напряжения свыше 10 В ток резко возрастает из-за пробоя диода. В отличие от выпрямительных плоскостных диодов, где преобладает тепловой пробой, пробой в стабилитроне полевой или лавинный. Полевой пробой возникает, когда связанные электроны в обеих зонах при увеличении электрического поля становятся

свободными, а лавинный — за счет размножения носителей тока при достижении достаточного потенциала поля. В зоне резкого изменения тока  $\Delta I$  обратное напряжение меняется очень незначительно (точки А и Б на рис. 1). Отношение изменения обратного напряжения к изменению тока в этой области называется динамическим сопротивлением стабилитрона

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Динамическое сопротивление  $R_d$  является основным параметром стабилитрона и показывает степень стабилизации напряжения  $U_{обр}$  при изменении тока  $I_{обр}$ .

Свойство стабилитрона поддерживать постоянное на-

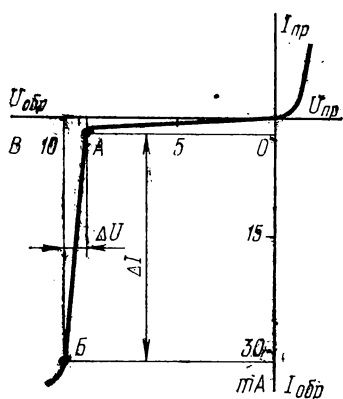


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона Д810

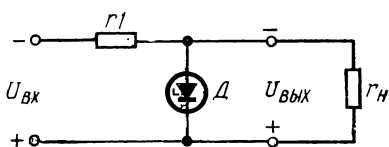


Рис. 2. Схема параметрического стабилизатора напряжения постоянного тока на полупроводниковом стабилитроне:

Д — полупроводниковый стабилитрон,  $r_1$  — резистор,  $R_H$  — резистор нагрузки

пряжение используют в стабилизаторах напряжения. На рис. 2 показана широко используемая в электронной технике схема параметрического стабилизатора напряжения постоянного тока на кремниевом стабилитроне. При изменении входного напряжения  $U_{вх}$  выходное напряжение почти не меняется, пока ток  $I_{обр}$  не выходит за пределы значений, обозначенных точками А и Б на вольт-амперной характеристике (см. рис. 1). Ток, текущий через резистор  $r_1$ , определяется в основном выражением

$$I = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{r_1}$$



При изменении входного напряжения на величину  $\Delta U_{вх}$  ток, текущий через резистор  $r_1$  изменится на  $\Delta U_{вх}/r_1$ , а изменение выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$  составит  $\Delta U_{вх} R_d/r_1$ .

Таким образом, отношение напряжений

$$\frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вых}} = \frac{r_1}{R_d}$$

и называется коэффициентом стабилизации схемы. Чем меньше динамическое сопротивление  $R_d$  стабилитрона, тем выше коэффициент стабилизации.

Исследуют стабилитрон по схеме, показанной на рис. 3.

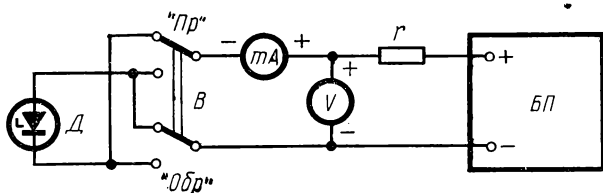


Рис. 3. Схема для исследования полупроводникового стабилитрона:

$D$  — полупроводниковый стабилитрон,  $mA$  — миллиамперметр,  $V$  — вольтметр,  $БП$  — блок питания,  $r$  — резистор,  $B$  — переключатель

## Оборудование и аппаратура

Миллиамперметр постоянного тока М366 на 0—30 мА . . . . .	1 шт.
Вольтметр постоянного тока М366 на 15 В . . . . .	1 »
Блок питания 30 В, 30 мА . . . . .	1 »
Резистор 1 кОм, 1 Вт . . . . .	1 »
Стабилитрон кремниевый Д810 . . . . .	1 »
Переключатель двухполюсный на два положения . . . . .	1 »
Провода соединительные площадью сечения 0,75 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	10 »

## Порядок выполнения работы

1. Собрать схему (см. рис. 3).
2. Установить переключатель  $B$  в положение «Пр».
3. Установить на блоке питания  $БП$  различные напряжения на стабилитроне (6—8 точек) и при каждом значении напряжения записать показания приборов в таблицу.

Т а б л и ц а

**Вольт-амперная характеристика полупроводникового стабилитрона**

Положение переключателя <i>B</i>	$U_{пр}$ , В	$I_{пр}$ , мА	$U_{обр}$ , В	$I_{обр}$ , мА	$R_{д}$ , Ом
«Пр» (прямой ток)					
«Обр» (обратный ток)					

4. Установить переключатель *B* в положение «Обр» и повторить операции п. 3.

5. По данным таблицы построить вольт-амперную характеристику стабилитрона.

6. На участке мало меняющегося обратного напряжения определить динамическое сопротивление стабилитрона.

**Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Схема испытания стабилитрона.
4. Таблица с измеренными величинами.
5. Вольт-амперная характеристика, построенная по результатам измерений.
6. Расчет динамического сопротивления стабилитрона.
7. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Чем отличается по принципу действия полупроводниковый стабилитрон от полупроводникового диода?
2. Какова особенность вольт-амперной характеристики полупроводникового стабилитрона?
3. Как определить динамическое сопротивление стабилитрона?
4. Как надо включить полупроводниковый стабилитрон в схему стабилизатора напряжения постоянного тока?
5. Какой стабилитрон может обеспечить лучшую стабилизацию — с меньшим или большим динамическим сопротивлением?

## ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА

### Работа № 36. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПОЛУПЕРИОДНОГО И ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы — ознакомиться с различными схемами выпрямления переменного тока и исследовать свойства полупроводниковых вентиляей.

**Пояснения.** С помощью выпрямителей переменный ток можно преобразовать в постоянный, т. е. выпрямить его. Известно несколько схем выпрямления переменного тока, из которых в работе предусмотрено изучение трех: однополупериодной однофазной, двухполупериодной однофазной и двухполупериодной трехфазной.

Однополупериодная однофазная схема выпрямления является простейшей схемой с одним вентиляем (рис. 1, а). Форма кривой выпрямленного тока, проходящего через активное сопротивление нагрузки  $r$ , показана на рис. 1, б.

Полупроводниковый вентиль пропускает через себя только одну полуволну, что объясняется вольт-амперной характеристикой вентиля: ток свободно проходит через выпрямитель, когда к слою с  $p$ -проводимостью подведен положительный потенциал. При изменении потенциала на отрицательный, при том же значении напряжения сила тока становится в несколько раз меньше, так как сопротивление его в этом направлении во много раз увеличивается.

Как видно из рис. 1, б форма кривой выпрямленного тока резко отличается от формы кривой постоянного тока. Поэтому однополупериодную схему выпрямления однофазного переменного тока применяют относительно редко.

Двухполупериодная однофазная мостовая схема выпрямления однофазного переменного тока имеет четыре вентиля (рис. 1, в). В этом случае выпрямляется каждая полуволна переменного тока и выпрямленный ток по форме больше приближается к постоянному. По двухполупериодной мостовой схеме выпрямления выпрямленный ток, форма которого показана на рис. 1, г, последовательно проходит через два вентиля, вследствие чего потери в выпрямителе возрастают и к. п. д. выпрямительной установки несколько

снижается. Эта схема широко распространена для зарядки аккумуляторов и в измерительной технике.

Двухполупериодная трехфазная мостовая схема является наилучшей схемой выпрямления переменного трехфазного тока в постоянный ток и предложена советским ученым проф. А. Н. Ларионовым (рис. 1, *д*). Из рис. 1, *е* видно, что кривая выпрямленного тока сглаживается по форме. Для еще боль-

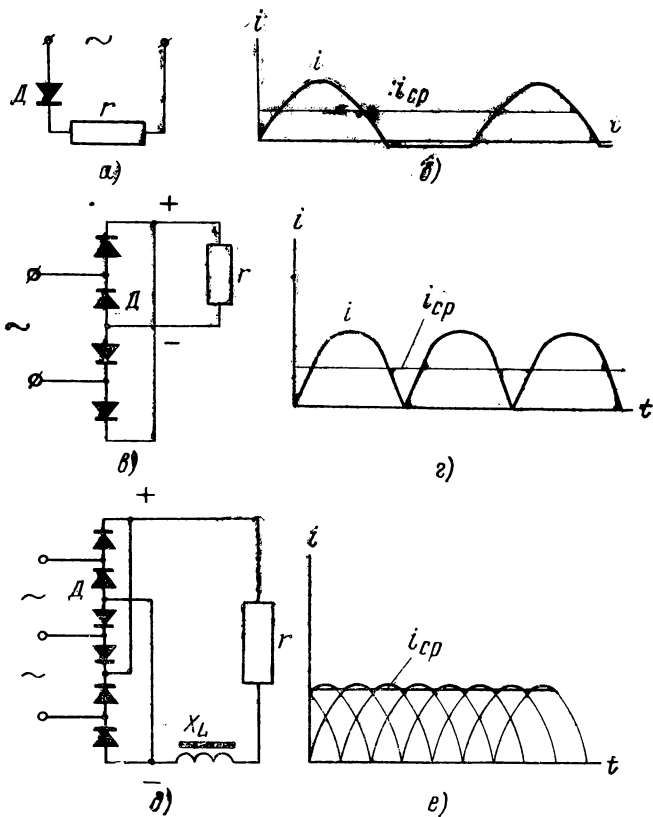


Рис. 1. Выпрямление переменного тока и форма кривых мгновенных значений выпрямленного тока:

*а* и *б* — однофазная однополупериодная схема и форма кривой, *в* и *г* — однофазная двухполупериодная мостовая схема и форма кривой, *д* и *е* — трехфазная двухполупериодная мостовая схема и форма кривой; *Д* — выпрямитель, *r* — активное сопротивление нагрузки,  $\chi_{cp}$  — дроссель с ферромагнитным сердечником, *i* — мгновенное значение выпрямленного тока,  $i_L$  — среднее значение выпрямленного тока

шего сглаживания выпрямленного тока и уменьшения пульсаций часто применяют дроссель и фильтры, которые включают последовательно с нагрузкой, потребляющей выпрямленный ток, и конденсаторы, включаемые параллельно нагрузке.

Эту схему применяют при больших мощностях: для зарядки аккумуляторов и других технологических целей, когда требуется большой выпрямленный ток.

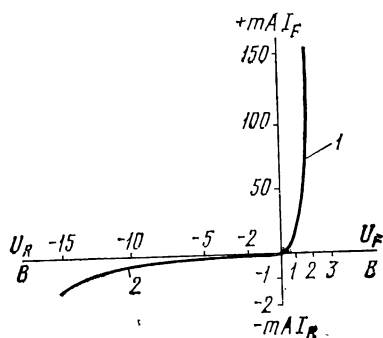


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика полупроводникового вентиля:

1 — прямой ток, 2 — обратный ток

Для выпрямления тока используют ртутные, газовые, ионно-электронные выпрямители — тиратроны, вакуумные выпрямители — электронные лампы и твердые полупроводниковые вентили (меднозакисные или купроксные, селеновые, германиевые и кремниевые).

В последнее время широкое распространение получили полупроводниковые вентили, основной характеристикой которых является их вольт-амперная характеристика (рис.

2). Если вентиль проводит ток только в одном направлении, а в другом совсем или почти не проводит, это значит, что он исправен. Если же сопротивление вентиля при прохождении постоянного тока одинаково в обоих направлениях, значит он пробит и непригоден к работе, так как переменный ток будет проходить через него одинаково как в прямом, так и в обратном направлениях. Полупроводниковые вентили хорошо работают при температуре не выше 60—65° С, поэтому для улучшения охлаждения их изготавливают с радиаторами. Вентили боятся влаги, поэтому их покрывают защитным лаком или другим водоотталкивающим веществом.

## Оборудование и аппаратура

Амперметр переменного тока на 5 А . . .	3 шт.
Амперметр постоянного тока на 0—5 А . . .	2 »
Миллиамперметр щитовой магнитоэлектрический на 0—500 мА . . . . .	1 »

Вольтметр постоянного тока на три предела измерения: 0—3 В, 0—15 В, 0—30 В	2 шт.
Аккумуляторные батареи 10НКН-45 и 4НКН-45 . . . . .	по 1 »
Диод полупроводниковый МД226 ( $U_{обр} = 400$ В) . . . . .	2 »
Потенциометр проволочный 10 Ом, 2,5 А . . . . .	1 »
Селеновый двуплечий выпрямитель АВС-100 с квадратными шайбами . . . . .	4 »
Селеновый выпрямитель по трехфазной мостовой схеме АВС-100 с квадратными шайбами . . . . .	3 комп.
Рубильник однополюсный на 40 А . . . . .	1 шт.,
Осциллограф электронный ЭО-7 . . . . .	1 »
Провода соединительные многожильные площадью сечения 2,5 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	12 »
Источник переменного тока трехфазный на 127 В мощностью 2 кВт, 50 Гц	

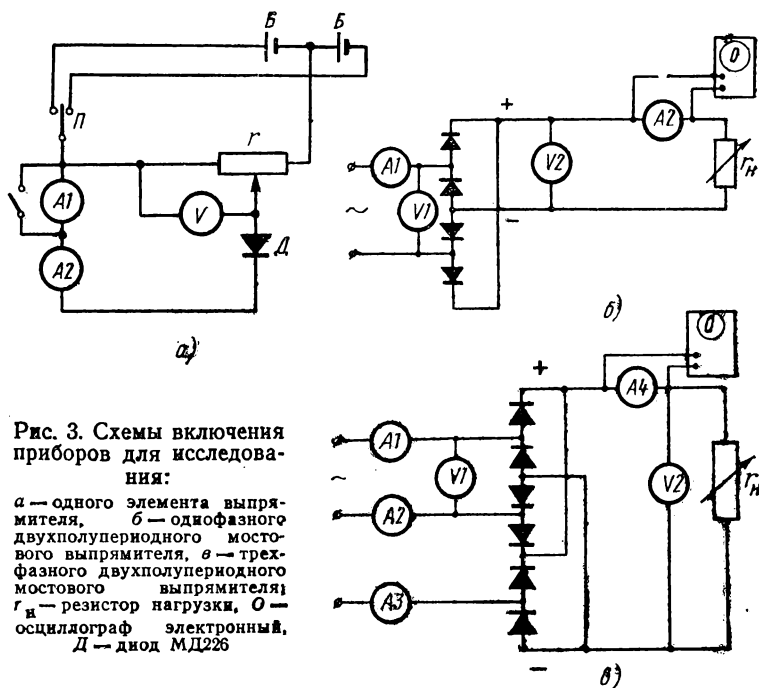
### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием и аппаратурой.
2. Собрать схему с одним полупроводниковым вентилем и включить приборы (рис. 3, а).
3. Снять вольт-амперную характеристику одной шайбы при прямом и обратном токах (напряжение не должно превышать 12 В). Результаты измерений записать в табл. 1 и по ней построить вольт-амперную характеристику одной шайбы.
4. Собрать двухполупериодную однофазную мостовую схему выпрямителя (рис. 3, б) и зарисовать на

Таблица 1

Вольт-амперная характеристика одной шайбы полупроводникового вентили

№ опыта	Измерено			Вычислено	Примечания
	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , А	$r$ , Ом	
					Прямой ток
					Обратный ток



кальку с экрана осциллографа форму выпрямленного тока. Записать показания приборов при нагрузке выпрямителя в табл. 2.

Таблица 2

Исследования двухполупериодного однофазного мостового полупроводникового выпрямителя

№ опыта	Сеть		Выпрямленный ток			Примечания
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$P=U_2 I_2$ , Вт	

5. Собрать двухполупериодную трехфазную мостовую схему выпрямителя (рис. 3, в), нагрузить выпрямитель, записать показания приборов в табл. 3 и зарисовать на кальку с экрана осциллографа форму выпрямленного тока.

Таблица 3

**Исследование двухполупериодного трехфазного мостового  
полупроводникового выпрямителя**

№ опыта	Сеть				Выпрямленный ток			Примечание
	$U_1, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$U_2, В$	$I_4, А$	$P=U_2 I_4, Вт$	
								Без дросселя
								С дросселем

6. Включить дроссель в цепь выпрямленного тока и повторить замеры. Показания приборов записать в табл. 3.

7. Составить отчет и сделать выводы о результатах исследования различных схем выпрямления и о качестве выпрямления различными схемами.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры вентиля, электроизмерительных приборов и оборудования.
3. Схема включения приборов при испытании одного вентиля (рис. 3, а) табл. 1 с результатами испытаний и вольт-амперная характеристика одной шайбы вентиля, построенная по табл. 1.
4. Схема включения однофазного мостового выпрямителя (рис. 3, б), табл. 2 с результатами испытаний и вольт-амперная характеристика выпрямителя, построенная по табл. 2..
5. Схема включения трехфазного мостового выпрямителя (рис. 3, в), табл. 3 с результатами испытаний и вольт-амперная характеристика, построенная по табл. 3.
6. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводниковый выпрямитель и почему он выпрямляет переменный ток?
2. Какие типы выпрямителей вы знаете?



3. По каким схемам включают выпрямительные шайбы?
4. Какое максимальное напряжение можно приложить к одной шайбе селенового выпрямителя?
5. Какая схема включения выпрямителей из исследованных дает наилучшее выпрямление?

### Работа № 37. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы — ознакомиться со схемой и работой усилителя низкой частоты на резисторах и определить его характеристики и основные параметры (коэффициент усиления, полосу пропускания и максимальную выходную мощность).

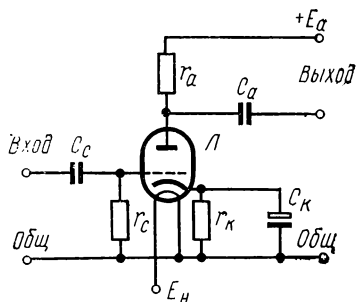


Рис. 1. Схема усилителя низкой частоты на резисторах:

Л — триод,  $r_c$ ,  $r_k$ ,  $r_a$  — резисторы,  $C_c$ ,  $C_k$ ,  $C_a$  — конденсаторы

**Пояснения.** Наличие коэффициента усиления в триодах, тетрадах или пентодах позволяет создать на них усилители напряжения или тока, с помощью которых слабые электрические сигналы усиливаются до уровня, достаточного для работы выходных исполнительных устройств (громкоговорителя, кинескопа, реле, электродвигателя и др.).

Схема усилителя напряжения низкой частоты на резисторах показана на рис. 1. Если на вход усилителя подано напряжение низкой частоты, на выходе его напряжение этой частоты имеет значительно бóльшую величину. Отношение выходного напряжения усилителя ко входному, называемое коэффициентом усиления по напряжению, является основным параметром усилителя. Зависимость выходного напряжения от входного называется амплитудной характеристикой усилителя (рис. 2, а). Для выяснения зависимости коэффициента усиления от частоты входного напряжения снимают частотную характеристику (рис. 2, б). Обе характеристики являются основными для усилителя и позволяют определить его основные параметры: коэффициент усиления, максимальную выходную мощность и полосу пропускания. Снимают эти характеристики по схеме, показанной на рис. 3.

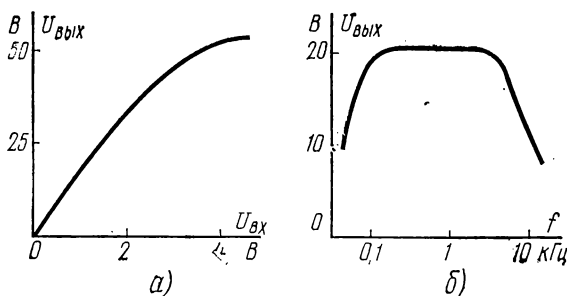


Рис. 2. Основные характеристики усилителя низкой частоты:  
а — амплитудная, б — частотная

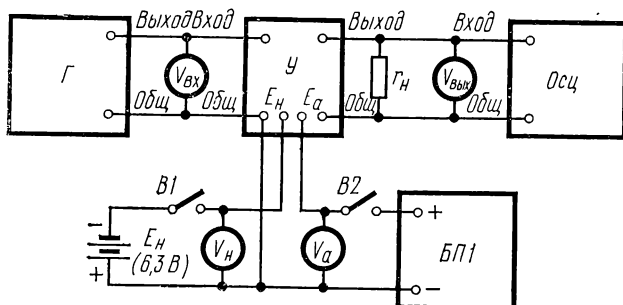


Рис. 3. Схема для исследования усилителя низкой частоты:

Г — генератор звуковых частот, У — усилитель низкой частоты,  $R_n$  — нагрузка,  $V_{вх}$ ,  $V_{вых}$  — вольтметры переменного тока,  $V_n$ ,  $V_a$  — вольтметры постоянного тока,  $E_n$  — батарея накала, БП1 — блок питания анода, Осц — осциллограф, В1, В2 — выключатели

## Оборудование и аппаратура

Генератор звуковых частот ГЗ-34 . . . . .	1 шт.
Вольтметр ВЗ-2А переменного тока ламповый для измерения входного и выходного напряжения до 300 В низкой частоты . .	2 »
Вольтметры постоянного тока на 300 и 10 В . . . . .	по 1 »
Осциллограф низкой частоты С1—18 . . . . .	1 »

Батарея накала 5НКН-45 . . . . .	1 шт
Блок питания анода 250 В, 1 А . . . . .	1 »
Резистор 100 кОм, 1 Вт . . . . .	1 »
Выключатели . . . . .	2 »
Провода соединительные площадью сечения 0,75 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	15 »
Усилитель низкой частоты включает:	
триод 6С1П . . . . .	1 »
резистор ( $r_c$ ) 0,5 МОм; 0,5 Вт . . . . .	1 »
резистор ( $r_a$ ) 25 кОм; 2 Вт . . . . .	1 »
резистор ( $r_k$ ) 1,2 кОм; 0,5 Вт . . . . .	1 »
конденсатор ( $C_c, C_a$ ) 0,015 мкФ; 500 В . . . . .	2 »
конденсатор электролитический ( $C_k$ ) 10 мкФ, 30 В . . . . .	1 »
Примечание. Усилитель должен быть собран заранее.	

## Порядок выполнения работы

Частотную характеристику снимают при фиксированном входном напряжении  $U_{вх} = 1$  В в следующем порядке:

1. Собрать схему испытания усилителя низкой частоты и тщательно проверить правильность соединений в цепи питания анода ( $+E_a$ ).

2. Включить выключателем  $B1$  цепь накала лампы усилителя и прогреть ее в течение 1 мин.

3. Установить на блоке питания  $БП1$  напряжение питания анода 250 В, перевести выключатель  $B2$  во включенное положение, контролировать напряжение по вольтметру  $V_a$ .

4. Установить и в дальнейшем поддерживать на генераторе  $\Gamma$  напряжение низкой частоты 1 В (контролировать вольтметром  $V_{вх}$ ).

5. Установить на генераторе  $\Gamma$  различные частоты (15—20 точек от 20 до 20 000 Гц), на каждой частоте записывать показания приборов в таблицы, по которой построить график зависимости выходного напряжения усилителя от частоты  $U_{вых} = \varphi(f)$ .

6. По полученному графику определить коэффициент усиления на частотах 100, 1000 и 10000 Гц и полосу пропускания усилителя.

Амплитудную характеристику снимают на частоте 1000 Гц в следующем порядке:

1. Включить выключателем  $B1$  цепь накала лампы усилителя и прогреть ее в течение 1 мин.

Т а б л и ц а

## Характеристики усилителя низкой частоты на резисторах

Характеристика	№ п/п	$U_{вх}$ , В	$f$ , Гц	$U_n$ , В	$U_a$ , В	$U_{вых}$ , В	Форма выходного напряжения
Частотная	1						
	2						
	3						
Амплитудная	1						
	2						
	3						

2. Установить на блоке питания *БП1* напряжение питания анода 250 В, перевести выключатель *В2* во включенное положение и контролировать напряжение по вольтметру  $V_a$ .

3. Установить на генераторе *Г* частоту 1000 Гц.

4. Установить на генераторе *Г* различные значения напряжения (12—15 точек от 0,1 до 10 В) (контролировать их вольтметром  $V_{вх}$ ), при каждом значении напряжения  $U_{вх}$  записывать показания приборов в таблицу, визуально наблюдать форму напряжения на осциллографе и заметить напряжение, при котором наблюдается искажение формы. Построить по данным таблицы график зависимости ( $U_{вых} = \varphi(V_{вх})$ ).

5. По полученному графику определить границу линейной зависимости и максимальную выходную мощность на нагрузке при отсутствии заметных искажений формы выходного напряжения.

## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры приборов, оборудования и аппаратуры.
3. Схема усилителя и его исследование.
4. Таблица с результатами испытаний.
5. Графики зависимостей  $U_{вых} = \varphi(f)$  и  $U_{вых} = \varphi(U_{вх})$  и рассчитанные значения параметров усилителя.
6. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Что такое усилитель низкой частоты и на каких электронных приборах его можно построить?

2. Каковы основные параметры усилителя низкой частоты и как их определяют?

3. Чем отличаются нижняя и верхняя границы частотной характеристики усилителя низкой частоты на резисторах?

4. Почему искажается форма выходного напряжения при больших входных напряжениях?

## Работа № 38. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы — ознакомиться с транзисторным усилителем низкой частоты и его работой, исследовать его основные параметры и снять характеристики.

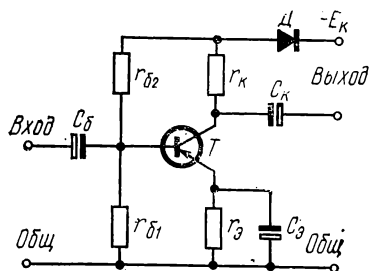


Рис. 1. Схема транзисторного усилителя низкой частоты:

$T$  — транзистор,  $r_{б1}$ ,  $r_{б2}$ ,  $r_{э}$ ,  $r_{к}$  — резисторы,  $C_6$ ,  $C_э$ ,  $C_к$  — конденсаторы,  $D$  — диод

**Пояснения.** Если в усилителе низкой частоты вместо электронной лампы применить полупроводниковый триод, такой усилитель называют транзисторным. Отсутствие цепи накала делает его более экономичным и долговечным по сравнению с ламповым. Габариты и масса транзисторного усилителя значительно меньше, чем усилителя на электронной лампе. Эти важные преимущества транзисторного усилителя

позволяют существенно улучшить параметры и эксплуатационные характеристики аппаратуры. Например, радиоприемник на транзисторах имеет массу в 2—3 раза меньшую, энергопотребление в 3—10 раз меньше, а долговечность в 20—50 раз больше, чем радиоприемник соответствующего класса на электронных лампах. Еще большая разница в указанных характеристиках наблюдается в аппаратуре измерительной техники, автоматики и телемеханики, а также переработки и передачи информации.

Схема наиболее распространенного транзисторного усилителя низкой частоты показана на рис. 1. Транзи-

стор  $T$  включен по схеме с общим эмиттером, что обеспечивает наибольший коэффициент усиления по напряжению. Еще одним ценным качеством транзисторного усилителя является невысокое напряжение питания (в

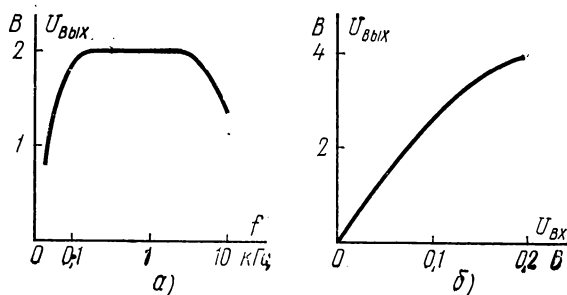


Рис. 2. Основные характеристики транзисторного усилителя низкой частоты:  
а — частотная, б — амплитудная

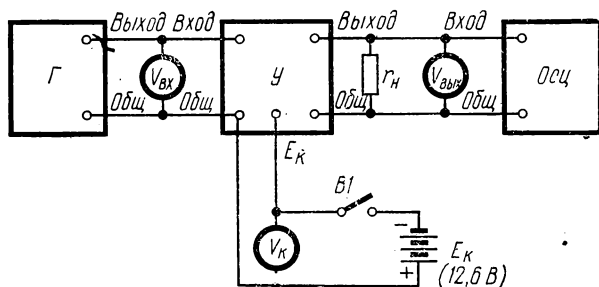


Рис. 3. Схема для исследования транзисторного усилителя низкой частоты:

$G$  — генератор звуковых частот,  $V_{вх}$  и  $V_{вых}$  — вольтметры переменного тока,  $V_k$  — вольтметр постоянного тока,  $E_k$  — батарея питания усилителя,  $Ocy$  — осциллограф,  $B1$  — выключатель,  $r_n$  — резистор нагрузки

данной схеме требуется 12,6 В вместо 250 В анодного напряжения в усилителе на электронной лампе). Основными характеристиками транзисторного усилителя так же как и для усилителя на электронной лампе являются частотная и амплитудная характеристики (рис. 2).

Исследуют транзисторный усилитель по схеме, показанной на рис. 3. На вход усилителя подают напряжение низкой частоты от внешнего генератора звуковых частот Г. Входные и выходные напряжения измеряют вольтметрами переменного тока  $V_{вх}$  и  $V_{вых}$ , а форму выходного напряжения наблюдают на экране осциллографа.

## Оборудование и аппаратура

Генератор звуковых частот ГЗ-34 . . . . .	1 шт.
Вольтметр переменного тока ламповый для измерения входного и выходного напряжения до 300 В низкой частоты ВЗ-2А, В7-2А или электронный Ф564 . . . . .	2 »
Вольтметр постоянного тока на 15 В . . . . .	1 »
Осциллограф низкой частоты С1—18 . . . . .	1 »
Батарея питания усилителя 5НKH-45 . . . . .	2 »
Резистор 5,1 кОм, 1 Вт . . . . .	1 »
Выключатель . . . . .	1 »
Провода соединительные площадью сечения 1 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	15 »
В усилитель низкой частоты входят:	
транзистор П41 . . . . .	1 »
резистор ( $r_{б1}$ , $r_k$ ) 1 кОм, 1 Вт . . . . .	2 »
резистор ( $r_{б2}$ ) 8,2 кОм, 0,5 Вт . . . . .	1 »
резистор ( $r_a$ ) 200 Ом, 0,5 Вт . . . . .	1 »
конденсатор электролитический ( $C_б$ , $C_k$ ) 1 мкФ, 20 В . . . . .	2 »
конденсатор электролитический ( $C_a$ ) 10 мкФ, 20 В . . . . .	1 »
диод полупроводниковый Д9 . . . . .	1 »
Примечание. Транзисторный усилитель низкой частоты должен быть собран заранее.	

## Порядок выполнения работы

Частотную характеристику снимают при фиксированном входном напряжении  $U_{вх}=0,1$  В в следующем порядке:

1. Собрать схему исследования транзисторного усилителя низкой частоты, проверить правильность подключения батареи питания.

2. Замкнуть выключателем В1 цепь питания усилителя. Установить и в дальнейшем поддерживать на генераторе Г напряжение низкой частоты, равное 0,1 В (контролировать вольтметром  $V_{вх}$ ).

3. Устанавливать на генераторе  $\Gamma$  различные частоты (15—20 точек от 20 до 20 000 Гц), записывать показания приборов в таблицу и по данным таблицы построить график зависимости выходного напряжения усилителя от частоты.

Т а б л и ц а

Характеристики транзисторного усилителя низкой частоты

Характеристика	№ п/п	$U_{вх}$ , В	$f$ , Гц	$U_k$ , В	$U_{вых}$ , В	Форма выход- ного напряже- ния
Частотная	1 2 3					
Амплитудная						

4. По полученному графику определить коэффициент усиления на частотах 100, 1000 и 10 000 Гц и полюсу пропускания усилителя.

Амплитудную характеристику снимают на частоте 1000 Гц в следующем порядке:

1. Замкнуть выключателем  $В1$  цепь питания усилителя. Установить на генераторе  $\Gamma$  частоту 1000 Гц.

2. Устанавливать на генераторе  $\Gamma$  различные напряжения низкой частоты: 12—15 точек от 0,01 до 1 В (контролировать их вольтметром  $V_{вх}$ ), при каждом значении входного напряжения записывать показания приборов в таблицу, визуально наблюдать форму напряжения на осциллографе, заметить напряжения, при которых наблюдаются искажения формы и записать их. По данным таблицы построить график зависимости  $U_{вых} = \varphi(U_{вх})$ .

3. По полученному графику определить границу линейной зависимости и максимальную выходную мощность на нагрузке при отсутствии заметных искажений формы выходного напряжения.



## Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры приборов, оборудования и аппаратуры.
3. Схемы усилителя и его исследования.
4. Таблица с результатами испытаний.
5. Графики зависимостей  $U_{\text{вых}} = \Phi(f)$  и  $U_{\text{вых}} = \Phi(U_{\text{вх}})$  и рассчитанные значения параметров усилителя.
6. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Какой элемент использован в транзисторном усилителе вместо электронной лампы?
2. Каковы основные параметры транзисторного усилителя низкой частоты?
3. Какими преимуществами обладает транзисторный усилитель низкой частоты по сравнению с усилителем на электронной лампе?
4. Что необходимо сделать для расширения частотной характеристики усилителя низкой частоты вниз?
5. Чем определяется верхняя граница частотной характеристики транзисторного усилителя низкой частоты?
6. Чем определяется граница линейной части амплитудной характеристики транзисторного усилителя низкой частоты?

## Работа № 39. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы — ознакомиться с устройством и принципом действия электронного генератора с самовозбуждением; провести его исследование, определить основные параметры и найти коэффициент обратной связи, при котором возникает генерация.

**Пояснения.** Если в усилителе соединить выход со входом, могут создаться условия для возникновения незатухающих электрических колебаний. Такое соединение называют обратной связью. На рис. 1 показана схема усилителя низкой частоты, охваченного обратной связью. Если напряжение обратной связи  $U_{\text{о.с}}$  противоположно по фазе входному напряжению  $U_{\text{вх}}$ , такая обратная связь называется отрицательной. Введение отрицательной обратной связи может увеличить устойчивость работы усилителя и улучшить его частотную характеристику, что широко используется в усилителях низкой частоты (например, в радиовещательных и телевизионных приемниках, в аппаратуре автоматики и телемеханики).

Если напряжение обратной связи  $U_{o.c}$  совпадает по фазе со входным  $U_{вх}$ , такая обратная связь называется положительной. При условии, когда напряжение положительной обратной связи больше входного напряжения, усилитель становится генератором незатухающих электрических колебаний независимо от того, подключен к его входу внешний генератор или нет. При включении такого усилителя в нем возникают незатухающие электрические колебания за счет бросков тока и напряжения и наличия шумов. Такой процесс называют самовозбуждением усилителя, а сам усилитель — генератором с самовозбуждением. Такие генераторы находят применение в радиопередатчиках, супергетеродинных

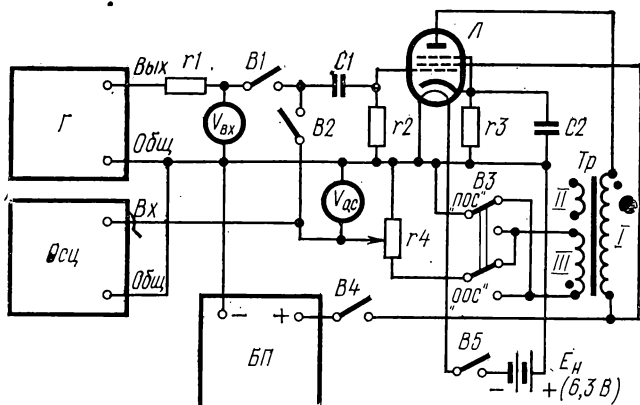


Рис. 1. Схема для исследования электронного генератора с самовозбуждением:

Г — внешний генератор звуковых частот, Осц — осциллограф, БП — блок питания,  $E_H$  — батарея накала,  $V_{вх}$  — вольтметр входного напряжения,  $V_{o.c}$  — вольтметр напряжения обратной связи,  $r1 - r3$  — резисторы,  $r4$  — потенциометр,  $B1, B2, B4$  и  $B5$  — однополюсные выключатели,  $B3$  — переключатель двухполюсный на два направления, Л — электронная лампа (6П14П)

приемниках и телевизорах, аппаратуре автоматики и телемеханики.

Исследование генераторов с самовозбуждением проводят по схеме, показанной на рис. 1. Наличие переключателя  $B3$  позволяет оценить влияние знака обратной связи на работу усилителя (генератора). Регулирование величины обратной связи производится потенцио-

метром  $r_4$ , что позволяет зафиксировать соотношение напряжения обратной связи и входного напряжения (коэффициент обратной связи), при котором возникает самовозбуждение усилителя.

### Оборудование и аппаратура

Генератор звуковой частоты ГЗ-34 . . . . .	1 шт.
Вольтметр переменного тока ламповый для измерения входного напряжения и напряжения обратной связи ВЗ-2А, В7-2А или электронный Ф564 . . . . .	2 »
Осциллограф низкой частоты С1-18 . . . . .	1 »
Батарея накала 5НКН-45 . . . . .	1 »
Блок питания цепи анода 150 В, 0,1 А . . . . .	1 »
Резистор ( $r_1$ ) 10 кОм, 1 Вт . . . . .	1 »
Соединительные провода площадью сечения 0,75—1 мм <sup>2</sup> , длиной 1,5 м . . . . .	15 »
В генератор входят:	
пентод 6П14П . . . . .	1 »
выходной трансформатор низкой частоты 1,5—3 Вт $I \approx 2000$ —3000 витков, $III \approx 5000$ —7000 витков (например от радиоприемников «Балтика» М-254», «Беларусь-4», «Минск-58») . . . . .	1 »
резистор ( $r_2$ ) 0,5 МОм, 1 Вт . . . . .	1 »
резистор ( $r_3$ ) 160 Ом, 1 Вт . . . . .	1 »
потенциометр ( $r_4$ ) 1 кОм, 2 Вт . . . . .	1 »
конденсатор (С1) 0,1 мкФ, 200 В . . . . .	2 »
конденсатор электролитический (С2) 10 мкФ, 20 В . . . . .	1 »
выключатели однополюсные . . . . .	4 »
переключатель 2П2Н . . . . .	1 »
Примечание. Схема генератора должна быть собрана заранее.	

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему исследования генератора (см. рис. 1).
2. Включить внешний генератор  $G$  и осциллограф и прогреть их в течение 15 мин.
3. Установить выключатель  $B_5$  во включенное положение и прогреть лампу  $L$  в течение 3 мин.
4. Установить на внешнем генераторе  $G$  частоту 1000 Гц.
5. Установить на блоке питания  $БП1$  напряжение 150 В, выключателем  $B_4$  подать анодное питание на схему.
6. Переключатель  $B_3$  установить в положение «ООС» (отрицательная обратная связь).

7. Выключателем  $B1$  подать на вход схемы напряжение внешнего генератора  $\Gamma$  и установить это напряжение равным 1 В (контролировать вольтметром  $V_{вх}$ ). Выключатель  $B2$  при этом должен быть выключен.

8. Потенциометром  $r4$  установить напряжение обратной связи 1 В (контролировать вольтметром  $V_{о.с.}$ ).

9. Включить выключатель  $B2$  и записать в таблицу показание вольтметра  $V_{о.с.}$ .

10. Выключатель  $B1$  отключить и записать в таблицу показания приборов. Убедиться в отсутствии электрических колебаний.

Т а б л и ц а

Результаты исследования схемы электронного генератора с обратной связью

Характер обратной связи	№ п/п	$U_{вх}$ , В	$U_{о.с.}$ , В	Форма электрических колебаний, наблюдаемых на экране осциллографа
Отрицательная (ООС)	1 2 3			
Положительная (ПОС)	1 2 3			

11. Установить переключатель  $B3$  в положение «ПОС» (положительная обратная связь), а выключатель  $B2$  отключить.

12. Установить выключатель  $B1$  во включенное положение. Установить на входе схемы напряжение, равное 1 В (контролировать вольтметром  $V_{вх}$ ).

13. Потенциометром  $r4$  установить напряжение обратной связи 0,5 В (контролировать вольтметром  $V_{о.с.}$ ).

14. Установить выключатель  $B2$  во включенное положение и записать в таблицу показания вольтметра.

15. Выключатель  $B1$  отключить и записать в таблицу показания приборов. Убедиться с помощью осциллографа в наличии затухания электрических колебаний.

16. Плавно вращать рукоятку потенциометра  $r4$  в сторону увеличения напряжения обратной связи (положение при выполнении п. 7) до появления незатухающих колебаний. Наличие колебаний наблюдается на эк-

ране осциллографа. Зарисовать форму этих колебаний.

17. Выключатель  $B2$  отключить, а выключатель  $B1$  включить. Записать показание вольтметра  $V_{o.c}$  в таблицу. Сравнить его с показанием вольтметра  $V_{вх}$ .

18. Потенциометром  $r4$  установить максимальное напряжение обратной связи.

19. Выключатель  $B1$  отключить, а выключатель  $B2$  включить. Записать показание вольтметра  $V_{o.c}$  в таблицу. Зарисовать форму электрических колебаний, наблюдаемую на экране осциллографа.

20. Рассчитать коэффициент обратной связи по данным таблицы при выполнении п. 16:

$$k_{o.c} = V_{o.c} / V_{вх}.$$

### **Содержание отчета**

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов, оборудования и аппаратуры.
3. Схема испытания генератора.
4. Таблица с измеренными величинами и зарисовками формы электрических колебаний.
5. Расчет коэффициента обратной связи при условии возникновения в схеме незатухающих электрических колебаний.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое обратная связь и к чему приводит введение ее в усилитель?
2. Что происходит с усилителем при наличии в нем положительной обратной связи с коэффициентом обратной связи больше единицы?
3. Как меняется форма напряжения генератора при изменении величины обратной связи?
4. На каких элементах выполняются генераторы электрических колебаний?
5. За счет чего происходит самовозбуждение генератора?

### **Работа № 40. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

Цель работы — ознакомиться с устройством и работой усилителя высокой частоты; провести его исследование и снять основные характеристики.

**Пояснения.** Устройства, предназначенные для усиления сигналов высокой частоты (выше 100 кГц), называются усилителями высокой частоты (УВЧ) и применяются в основном в радиоприемной аппаратуре. Их выполняют как на электровакуумных лампах высокой

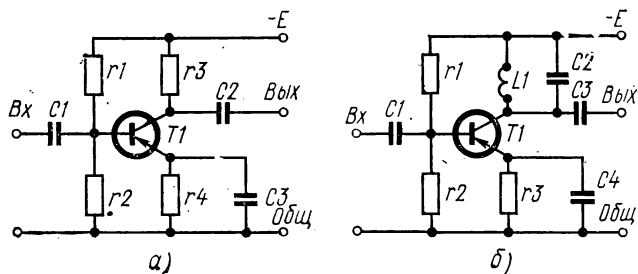


Рис. 1. Схемы УВЧ:  
а — аperiodического, б — резонансного

частоты, так и на высокочастотных полупроводниковых приборах. УВЧ может быть выполнен на резисторах — аperiodический УВЧ (рис. 1, а) или на резонансных

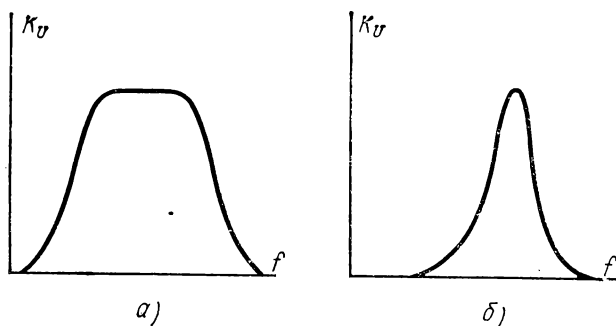


Рис. 2. Частотные характеристики УВЧ:  
а — аperiodического, б — резонансного;  $k_U$  — коэффициент усиления

контурах — резонансный УВЧ (рис. 1, б). В качестве транзистора  $T1$  может быть использован высокочастотный триод (например, П403). Аperiodический УВЧ от-

личается широкой полосой пропускания частот (рис. 2, а), а резонансный имеет узкую полосу пропускания (рис. 2, б), что позволяет лучше выделять сигналы нужной радиостанции.

Исследуют УВЧ по схеме, показанной на рис. 3, снимая основные характеристики: амплитудную

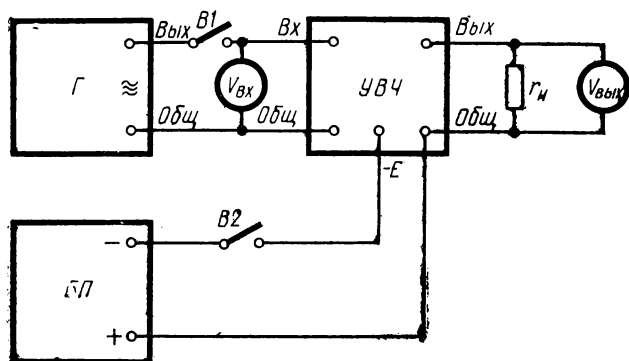


Рис. 3. Схема для исследования УВЧ:

$\Gamma$  — генератор высоких частот,  $V_{вх}$ ,  $V_{вых}$  — вольтметры высокой частоты, БП — блок питания усилителя,  $г_n$  — резистор нагрузки,  $B1$  и  $B2$  — выключатели

(рис. 4) и частотную (см. рис. 2, а и б), по которым определяют основные параметры УВЧ; коэффициент усиления  $k_n = U_{вых}/U_{вх}$  и полосу пропускания  $\Delta f =$

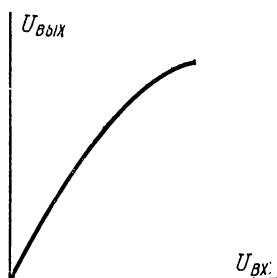


Рис. 4. Амплитудная характеристика УВЧ

$=f_{\text{макс}} - f_{\text{мин}}$ , где  $f_{\text{макс}}$  и  $f_{\text{мин}}$  граничные частоты, на которых частотная характеристика принимает значения 0,7 в относительных единицах.

## Оборудование и аппаратура

Генератор высоких частот (Г) типа ГЗ-33 или ГСС-6 . . . . .	1 шт.
Вольтметр ламповый ( $V_1$ и $V_2$ ) типа ВЗ-2А . . .	2 »
Блок питания (БП) типа ВСП-30 на 30 В, 2 А . .	1 »
Резистор нагрузочный МТ-1-10 кОм $\pm 10\%$ . .	1 »
Усилитель высокой частоты (по схеме рис. 1, б) включает:	
транзистор П403 . . . . .	1 »
резисторы ( $r1$ ) МТ-0,5—12 кОм $\pm 10\%$ . . .	1 »
( $r2$ ) МТ-0,5—1 кОм $\pm 10\%$ . . . .	1 »
( $r3$ ) МТ-0,5—100 Ом $\pm 10\%$ . . .	1 »
конденсаторы ( $C1$ , $C3$ и $C4$ )	
КМ5-НЗО-0,01 мкФ. . . . .	3 »
( $C2$ ) КМ4-М750-240 пФ . . . . .	1 »
индуктивность ( $L$ ) 50 мкГ . . . . .	2 »
Выключатели . . . . .	2 »
Соединительные провода многожильные площадью сечения 0,35 мм <sup>2</sup> , длиной 1 м . . . . .	12 »
Примечание. Схема УВЧ должна быть собрана в лаборатории заранее.	

## Порядок выполнения работы

Частотную характеристику снимают в следующем порядке:

1. Собрать схему (см. рис. 3).

2. Установить на блоке питания БП напряжение питания  $E_{\text{пит}} = 5$  В.

3. Установить на генераторе Г выходное напряжение 10 мВ на частоте 100 кГц.

4. Включить выключатели В1 и В2.

5. Повышая частоту генератора Г, устанавливать различные значения частот (10—12 точек), на которых выходное напряжение УВЧ ( $V_2$ ) равно или выше 100 мВ (выходное напряжение генератора Г поддерживать строго постоянным), при каждом значении частоты показания приборов записывать в таблицу, по которой построить график зависимости  $U_{\text{вых}} = \varphi(f)$ .



Основные характеристики УВЧ

Характеристика	№ опыта	$f$ , кГц	$E_{\text{пит'}}$ В	$V_1$ , мВ	$V_2$ , мВ	Примечания
Частотная	1 2 3					
Амплитудная	1 2 3					

6. По полученному графику определить полосу пропускания усилителя  $\Delta f$  и резонансную частоту усилителя  $f_0$ , на которой усиление максимально.

Амплитудную характеристику снимают в следующем порядке:

1. Установить на генераторе  $\Gamma$  резонансную частоту усилителя  $f_0$  (измеренную при снятии частотной характеристики усилителя) и выходное напряжение 1 мВ.

2. Устанавливать на генераторе  $\Gamma$  различные значения выходного напряжения (8—10 точек), начиная с 1 мВ до 1 В, при каждом значении выходного напряжения генератора  $\Gamma$  показания приборов записывать в таблицу, по которой построить зависимости  $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$ .

3. На линейном участке полученного графика определить максимальное значение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  УВЧ.

### Содержание отчета

1. Наименование отчета.
2. Параметры электроизмерительных приборов, оборудования и аппаратуры.
3. Электрические схемы, собранные для исследования частотной и амплитудных характеристик.
4. Таблица с результатами измерений.
5. Графики с частотными и амплитудными характеристиками.
6. Выводы.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое усилитель высокой частоты и на каких усилительных элементах он может быть собран?
2. Какие существуют схемы усилителей высокой частоты?
3. Каково основное различие между частотными характеристиками апериодического и резонансного УВЧ?
4. Чем определяется верхняя частотная граница апериодического УВЧ и как ее можно повысить?
5. Чем определяется полоса пропускания резонансного УВЧ? За счет чего ее можно изменить?

## ЛИТЕРАТУРА

Зорохович А. Е., Калинин В. К. Электротехника с основами промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1975.

Китаев В. Е., Шляпнотх Л. С. Электротехника с основами промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1973.

Касаткин А. С.	Электротехника. М., «Высшая школа», 1969.
----------------	-------------------------------------------

Касаткин А. С.	Основы электротехники. М., «Высшая школа», 1975.
----------------	--------------------------------------------------

Глебович А. А., Киселев С. Л. Электрооборудование машин и электропривод. М., «Колос», 1975.

Грамматикати В. М., Шляпнотх Л. С., Петров В. К. Преподавание электротехники с основами промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1972.

Шляпнотх Л. С., Петров В. К. Сборник задач по электротехнике с основами промышленной электроники. М. «Высшая школа», 1969.

Усик В. П., Вахольский Б. М. Лабораторные работы по общей электротехнике. М., «Высшая школа», 1972.

Поляков В. А. Практикум по электротехнике. Учебное пособие для учащихся 9 и 10 классов. М., «Просвещение», 1969.

Новиков П. Н., Кауфман В. Я. Задачник по электротехнике с основами промышленной электроники. М., «Высшая школа», 1975.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> . . . . .	<b>3</b>
Общие правила выполнения лабораторных работ . . . . .	7
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ . . . . .	7
<b>Постоянный ток</b> . . . . .	<b>9</b>
Работа № 1. Определение сопротивления электрической цепи с помощью амперметра и вольтметра . . . . .	9
Работа № 2. Последовательное соединение проводников и проверка падения напряжения в отдельных проводниках	12
Работа № 3. Параллельное соединение проводников и проверка первого закона Кирхгофа . . . . .	14
Работа № 4. Последовательное, параллельное и смешанное соединения аккумуляторов . . . . .	17
Работа № 5. Измерение работы и мощности в цепи постоянного тока . . . . .	21
<b>Электромагнетизм</b> . . . . .	<b>24</b>
Работа № 6. Изучение магнитного поля проводника и катушки с током . . . . .	24
<b>Переменный ток</b> . . . . .	<b>26</b>
Работа № 7. Исследование электрической цепи переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями	26
Работа № 8. Измерение работы и мощности в цепи однофазного переменного тока . . . . .	32
Работа № 9. Цепь переменного тока с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора. Резонанс напряжений . . . . .	37
Работа № 10. Цепь переменного тока с параллельным соединением конденсатора и катушки. Резонанс токов . .	43
Работа № 11. Измерение фазных и линейных токов и напряжений в цепи трехфазного тока при соединении звездой и треугольником . . . . .	47
Работа № 12. Измерение мощности и коэффициента мощности в цепи трехфазного переменного тока . . . . .	53

Электроизмерительные приборы и электрические измерения . .	61
Работа № 13. Измерение сопротивлений мостом сопротивлений . . . . .	61
Работа № 14. Измерение мегомметром сопротивления изоляции проводов . . . . .	64
Работа № 15. Измерение сопротивлений методом одного вольтметра . . . . .	67
Работа № 16. Поверка технических электроизмерительных приборов (амперметра и вольтметра) . . . . .	69
Работа № 17. Измерение температур электрическими методами . . . . .	73
Трансформаторы . . . . .	76
Работа № 18. Испытание однофазного трансформатора	76
Работа № 19. Включение однофазных трансформаторов в сеть трехфазного тока . . . . .	81
Работа № 20. Исследование работы трехфазного трансформатора . . . . .	85
Работа № 21. Включение двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу . . . . .	91
Электрические машины . . . . .	97
Работа № 22. Определение начал и концов фазных обмоток трехфазного асинхронного двигателя . . . . .	97
Работа № 23. Сборка схем и включение в сеть трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми и фазными роторами и резисторным пуском . . . . .	101
Работа № 24. Сборка схемы и включение в сеть трехфазного асинхронного электродвигателя переключением обмоток со звезды на треугольник . . . . .	105
Работа № 25. Включение в сеть синхронного генератора трехфазного тока и регулирование напряжения на его зажимах . . . . .	108
Работа № 26. Включение в сеть генератора постоянного тока параллельного возбуждения и регулирования напряжения на его зажимах . . . . .	114
Работа № 27. Включение в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и регулирование его скорости (частоты) вращения . . . . .	118
Электровакуумные приборы . . . . .	123
Работа № 28. Исследование и снятие характеристик диода . . . . .	123
Работа № 29. Исследование и снятие характеристик триода . . . . .	127
Работа № 30. Исследование и снятие характеристик тетрода . . . . .	131
Работа № 31. Исследование и снятие характеристик пентода . . . . .	135
Полупроводниковые приборы . . . . .	139
Работа № 32. Исследование и снятие характеристик полупроводникового диода . . . . .	139
Работа № 33. Исследование и снятие характеристик транзистора . . . . .	143
Работа № 34. Исследование и снятие характеристик тиристора . . . . .	147
Работа № 35. Исследование полупроводникового стабилитрона . . . . .	150

Электронная аппаратура . . . . .	154
Работа № 36. Исследование однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей . . . . .	154
Работа № 37. Исследование резисторного усилителя низкой частоты . . . . .	160
Работа № 38. Исследование транзисторного усилителя низкой частоты . . . . .	164
Работа № 39. Исследование электронных генераторов с самовозбуждением . . . . .	168
Работа № 40. Исследование усилителя высокой частоты	172
Литература . . . . .	178

*Александр Александрович Глебович*

**Лабораторные работы по электротехнике  
с основами промышленной электроники**

Редактор А. Ш. Долгова. Художник В. Н. Панферов. Художествен-  
ный редактор Т. В. Панина. Технический редактор Е. И. Герасимова.  
Корректор М. А. Минкова

Т—06642 Сдано в набор 14/VIII—75 г. Подп. к печати 6/V—76 г.  
Формат  $84 \times 108^{1/32}$  Бум. тип. № 3 Объем 5,75 печ. л. Усл. п. л. 9,66  
Уч.-изд. л. 8,84 Изд. № ЭГ—243 Тираж 50 000 экз. Цена 20 коп.

План выпуска литературы издательства

«Высшая школа» (профтехобразование) на 1976 г. Позиция № 35  
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,  
Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
Хохловский пер., 7. Зак. 3867.

20 коп.

